

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta Strojní

Katedra automatizační techniky a řízení



Podpora experimentální výuky automatického řízení
Experiments Support for Automatic Control Teaching
Process

Vedoucí diplomové práce

doc.Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

Student

Bc. Martin Šíma

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Martin Šíma

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

3902T004 Automatické řízení a inženýrská informatika

Téma:

Podpora experimentální výuky automatického řízení
Experiments Support for Automatic Control Teaching Process

Zásady pro vypracování:

1. Popište laboratorní model soustavy dvou nádrží, zaměřte se na jeho hardwarové a softwarové vybavení.
2. Zhodnoťte vybrané metody syntézy mnohorozměrových systémů, zaměřte se na dvourozměrové systémy.
3. Navrhněte řízení laboratorního modelu jak pro dva jednorozměrové systémy, tak i pro mnohorozměrový systém. Správnost návrhu verifikujte.
4. Navrhněte a realizujte uživatelskou aplikaci, která usnadní experimenty s laboratorním modelem.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte směr dalšího řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

FARANA, R., SMUTNÝ, L., VÍTEČEK, A., VÍTEČKOVÁ, M., WAGNEROVÁ, R. *Doporučení pro psaní odborných textů z oblasti automatizace a informatiky*. Skripta FS VŠB-TU Ostrava, 2008, 80 str. ISBN 978 - 80 - 248 - 1925 - 9

GOODWIN, C.G., GRAEBE, F.S. & SALGADO, E.M. *Control System Design*. New Jersey: Prentice Hall. 2001, 908 pp. ISBN 0-13-958653-9.

HAVLENA, V. & ŠTECHA, J. *Moderní teorie řízení*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2000.

KINCL, J. *Návrh a realizace robustních algoritmů řízení pro laboratorní modely*. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2007. 73 stran. Diplomová práce, vedoucí: Wagnerová, R.

NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systému*. Ostrava: Vydavatelství Montanex a.s. 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení diplomanta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé diplomové práce může být naloženo dle uvážení vedoucího ročníkového projektu jako jejího spoluautora a doporučení vedoucího katedry.

V případě publikace výsledků diplomové práce nebo její významné části budu uveden jako spoluautor.

V Ostravě, dne

.....

podpis diplomanta

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO), má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3)
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu i závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO .
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby

V Ostravě, dne

.....

Martin Šíma

Martin Šíma

Na Šištotě 720

Valašské Meziříčí

757 01

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Šíma, M. *Podpora experimentální výuky automatického řízení*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra Automatizační techniky a řízení – 352, 2014, 75s. Vedoucí práce: Wagnerová, R.

Diplomová práce se zabývá návrhem uživatelské aplikace pro měření na laboratorním modelu v programu MATLAB. V práci je popsáno hardwarové a softwarové vybavení laboratorního modelu soustavy nádrží. Dále je popsána syntéza mnohorozměrných systémů řízení se zaměřením na dvourozměrné systémy a postup syntézy je ukázán na dvou vybraných příkladech.

ANNOTATION OF THE MASTER THESIS

Šíma, M. *Experiments Support for Automatic Control Teaching Process*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering Department of Control Systems and Instrumentation - 352, 2014. 75p. Thesis head: Wagnerová, R.

The thesis deals with user application design for experiments with the laboratory model of two tanks in MATLAB environment. The thesis also describes hardware and software equipment of laboratory model system of two tanks. Further, there are evaluated syntheses of multivariable systems with focus on two variable systems and steps control design of two chosen systems.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	- 7 -
Úvod	- 9 -
1 Popis laboratorního modelu	- 10 -
1.1 Charakteristika laboratorního modelu	- 11 -
1.2 Funkce laboratorního modelu	- 12 -
1.3 Vazby laboratorního modelu	- 13 -
1.4 Elektronická ovládací jednotka laboratorního modelu	- 14 -
1.5 Popis jednotky CTRL V3	- 15 -
1.6 Propojení laboratorního modelu s počítačem	- 16 -
1.7 Aplikace pro měření na modelu	- 17 -
2 Tvorba aplikací v programu MATLAB	- 18 -
2.1 Základní atributy tvorby grafického uživatelského rozhraní	- 19 -
2.2 Prostředí GUIDE	- 19 -
3 Mnohorozměrné regulační obvody	- 21 -
3.1 Stabilita mnohorozměrných regulačních obvodů	- 25 -
3.2 Autonomnost a invariantnost	- 26 -
3.3 Dvourozměrné systémy	- 28 -
3.4 Příklad návrhu mnohorozměrného regulátoru	- 30 -
4 Návrh řízení pro laboratorní model	- 47 -
4.1 Identifikace laboratorního modelu	- 47 -
4.2 Návrh jednorozměrných regulátorů	- 51 -
4.3 Návrh mnohorozměrného regulátoru	- 53 -
4.4 Ověření návrhu regulátoru na laboratorním modelu	- 55 -
5 Uživatelská aplikace	- 59 -
Závěr	- 63 -
Použitá literatura	- 65 -
Přílohy	- 67 -

Seznam použitých značek a symbolů

CTRL V3	měřicí jednotka pro přenos dat mezi soustavou a PC
GAČR	Grantová agentura České republiky
GUI	<i>Graphical User Interface</i> , grafické uživatelské rozhraní
GUIDE	<i>Graphical User Interface Development Environment</i> , vývojové prostředí grafického uživatelského rozhraní
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i> , integrované prostředí pro technické výpočty
MF634	<i>Multifunction I/O card</i> , Multifunkční vstupně výstupní měřicí karta
MIMO	<i>Multiple input Multiple output</i> , více vstupů více výstupů
MOM	metoda optimálního modelu
MPM	metoda požadovaného modelu
PC	<i>Personal Computer</i> , Osobní počítač
PCI Express	novější standard systémové sběrnice
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i> , počítačová sběrnice pro připojení periférií k základní desce
PI	proporcionálně integrační regulátor
RJ45	typ zapojení síťových kabelů UTP a STP
RS232	seriová linka používaná jako komunikační rozhraní PC
Simulink	<i>Simulation and Model-Based Design</i> , Blokové prostředí v programu MATLAB umožňující simulaci
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , univerzální sériová sběrnice slouží pro připojení periférie k počítači
e	vektor regulační odchylky
G_D	matice tvořená prvky diagonály matice soustavy
$G_{KČ}$	přenosová matice korekčního členu
G_N	matice tvořená prvky mimo diagonálu matice soustavy
G_o	matice otevřeného regulačního obvodu
G_P	přenosová matice poruchy
G_R	přenosová matice regulátoru
G_S	přenosová matice soustavy
$G_s(s)$	obrazový přenos soustavy
G_{ve}	odchylová přenosová matice poruchy
G_{vy}	přenosová matice poruchy
G_{we}	odchylová přenosová matice řízení

\mathbf{G}_{wy}	přenosová matice řízení
\mathbf{I}	jednotková matice
K	konstanta zesílení
k_i	konstanta zesílení ($i = 0, 1, 2, \dots$)
k_P	zesílení regulátoru
M	mnohočlen v čitateli
N	charakteristický mnohočlen regulačního obvodu
n	stupeň charakteristického mnohočlenu
\mathbf{P}	přenosová matice P struktury
\mathbf{P}_D	matice tvořená prvky diagonály \mathbf{P}
\mathbf{P}_N	matice tvořená prvky mimo diagonálu \mathbf{P}
$s = \alpha + j\omega$	komplexní proměnná, $[s^{-1}]$
s_i	kořeny mnohočlenu s komplexní proměnnou s
t	(spojitý) čas
T_i	časová konstanta ($i = 0, 1, 2, \dots$)
T_I	integrační časová konstanta
\mathbf{u}	vektor akční veličiny
\mathbf{v}	vektor poruchové veličiny
\mathbf{w}	vektor žádané veličiny
\mathbf{y}	vektor výstupní (regulované) veličiny

Úvod

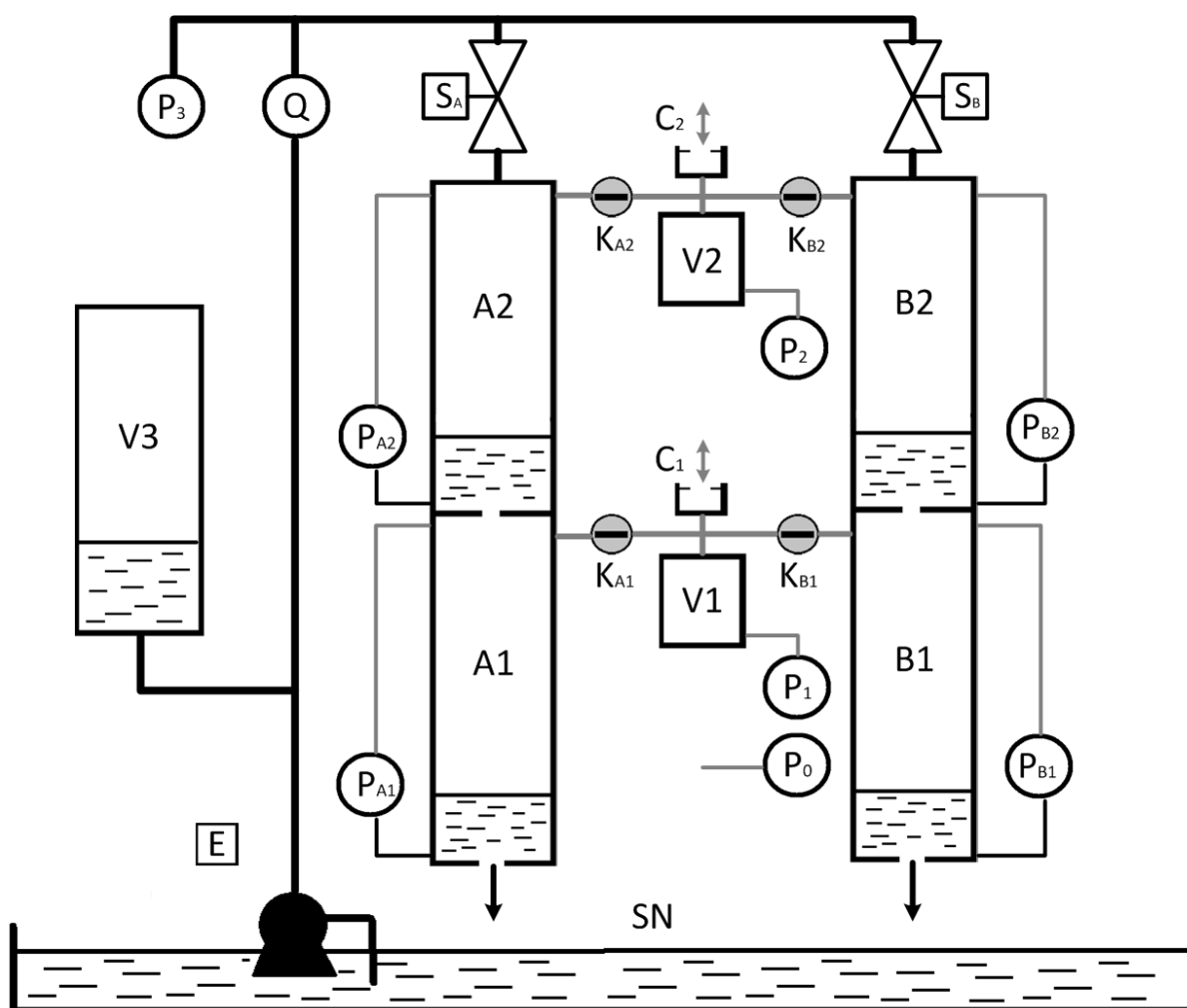
Práci lze rozdělit na dvě části, a to teoretickou a praktickou. Teoretická část se bude zabývat syntézou řízení mnohorozměrných systémů. Nejjednoduššími mnohorozměrnými systémy jsou dvourozměrné systémy (dva vstupy a dva výstupy), na které se v této práci zaměříme. Struktura dvourozměrného systému představuje popis jednotlivých jednorozměrných přenosů a jejich vzájemné interakce. Návrh řízení mnohorozměrného systému popíšeme na teplo-vzdušném modelu představujícím teoretický příklad dvourozměrného systému. Ověření správnosti návrhu řízení pro teplo-vzdušný model bude provedeno pomocí číslicové simulace v programu MATLAB/Simulink. V teoretické části se dále zabýváme popisem tvorby aplikací v programu MATLAB/GUIDE.

Praktická část práce se věnuje laboratornímu modelu soustavy nádrží, který je umístěn v laboratoři F205. Model byl navržen a vyroben na Katedře řízení procesů a výpočetní techniky Univerzity Pardubice v rámci projektu GAČR 102/03/0625 – Konsorciální přístup k vývoji experimentálních modelů. Model je určen pro výuku matematického modelování a řízení vícerozměrných soustav. Návrh řízení laboratorního modelu vychází z teoretické části této práce, ale jeho ověření bude reálnou číslicovou simulací. Laboratorní model je řízen osobním počítačem, se kterým komunikuje pomocí měřicí karty MF634. Hlavním cílem této práce je vytvoření návrhu a realizace aplikace pro ovládání modelu vytvořeného v programu MATLAB/GUIDE. Aplikace bude zjednodušovat a zrychlovat měření a řízení laboratorního modelu. Zároveň bude usnadňovat experimenty studentům se základními znalostmi v oboru automatického řízení bez nutnosti znalostí programu MATLAB.

1 Popis laboratorního modelu

Laboratorní modely jsou navrženy zařízení, které jsou sestaveny pro simulování reálných problémů a řízení. Modely jsou zaměřeny na přesnost měření, bezpečnost, mobilitu, jednoduchost a malou energetickou spotřebu. Modely slouží především k podpoře výuky v laboratořích, kde studenti z názorných ukázek mohou pochopit cíle řízení.

Laboratorní model soustavy nádrží se skládá ze dvou částí mechanické a elektrické. Mechanickou část představují 4 nádrže na vodu (A1, A2, B1, B2) a jedna sběrná nádoba SN, vzdušník V3, dvě vzduchové nádrže (V1, V2), čtyři kohouty (K_{A1} , K_{A2} , K_{B1} , K_{B2}), dvě výměnné clonky (C1, C2) a propojovací armatura. Tato část je doplněna o instrumentaci tvořenou v minimální variantě 2 tlakovými čidly (P_{A1} , P_{B1}), dvěma ventily (ovládanými modelářskými servo-motory S_A, S_B) a čerpadlem E. V rozšířené variantě je instrumentace doplněna o 6 tlakových čidel (P_0 , P_1 , P_2 , P_3 , P_{A2} , P_{B2}) a o průtokoměr Q.



Obr. 1 - Schéma laboratorního modelu soustavy nádrží

Elektrická část (stejná pro obě varianty) je tvořena zdrojem, řídicí jednotkou a připojovacím panelem s deskou přizpůsobení signálů. Řídicí jednotka zajišťuje generování řídicích signálů pro ovládání servo-motoru a čerpadla, měření 4 frekvenčních signálů (průtokoměr), 12 analogových signálů (8 tlaků, 4 potenciometrů) a dvouhodnotových signálů (poloh 4 přepínačů). Dále zajišťuje řízení příkonu čerpadla ve dvou režimech (podle přepínačů) – přímé řízení příkonu čerpadla nebo zpětnovazební řízení tlaku P_3 . Hodnoty signálů (ventily a čerpadlo/tlak) lze zadávat buď pomocí potenciometrů, nebo externím napětím (podle přepínačů). Všechny funkce lze ovládat a hodnoty všech signálů lze získat prostřednictvím RS232.

1.1 Charakteristika laboratorního modelu

Soustava se skládá ze 2 výstupů, 2+1 vstupů s nastavitelnou strukturou (mechanické kohouty K_{A1} , K_{A2} , K_{B1} , K_{B2} a programově - řízení příkonu čerpadla nebo tlaku P_3) a nastavitelnou mírou vzájemného ovlivňování (clonky C1 a C2). Vzájemné ovlivňování je možné zvolit ve třech úrovních:

- a) těsné – uzavřené nádrže, zrušeno spojení společného objemu s okolním prostředím (statika i dynamika dána rozměry nádrží)
- b) volné – spojení společného objemu s okolím přes výměnnou clonu (nulové statické zesílení, dynamika daná rozměry nádrží a plochou clony)
- c) žádné – otevřená nádrž, objem nad hladinou je spojen s okolím

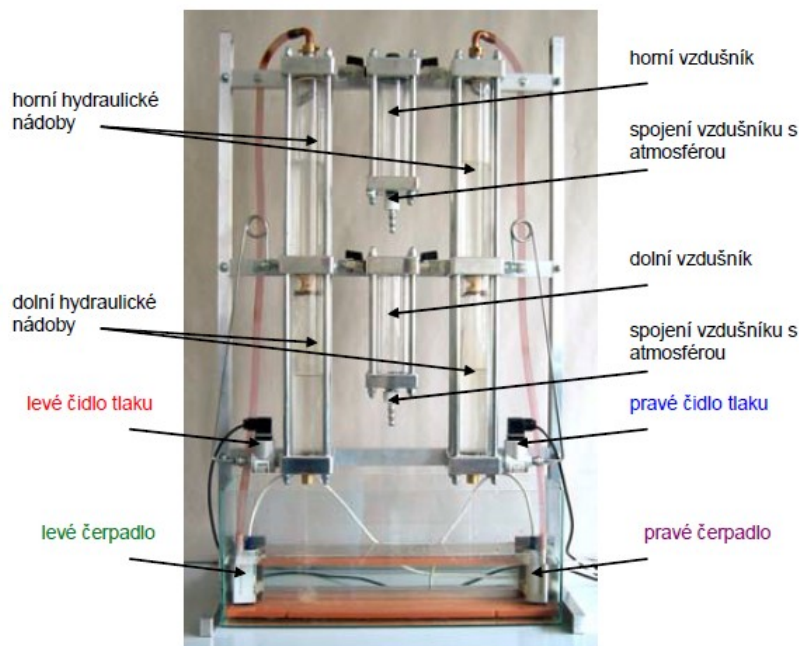
Soustava má minimálně 7 významných stavových veličin (+5 při uvažování teploty ve vzduchových objemech, okolní teploty a absolutního tlaku).

Nelinearita v statické charakteristice je daná jednak nelineárními charakteristikami čerpadla a ventilů a jednak odmocninovou závislostí výtokové rychlosti (na výšce hladiny a rozdílu tlaků) a nelineární závislostí výtokové rychlosti vzduchu clonou (v závislosti na poměru absolutních tlaků a teplotě).

Dynamické chování soustavy (doba ustálení hladin h_{A1} , h_{B1}) je daná především zvolenými clonkami C1 a C2.

1.2 Funkce laboratorního modelu

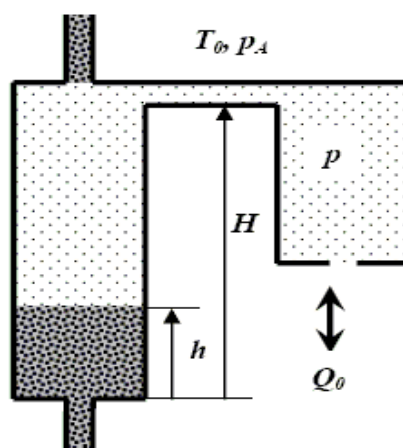
Vícerozměrná soustava je systém propojených hydraulických nádrží s pneumatickými prvky. Ze sběrné nádoby je kapalina čerpána dvěma čerpadly do horních hydraulických nádob, které přes clonky protékají do dolních hydraulických nádob nádrží a zpět do sběrné nádoby. Fotografie modelu s popisky lze vidět na Obr. 2.



Obr. 2 – Laboratorní model soustavy nádrží [Dušek, F., Honc, D. 2004]

Spojení vodních objemů z obou nádob nám umožní zjistit vnitřní vazby soustavy. Toto spojení, nám způsobí omezení pracovní oblasti, jelikož nemůžeme pohybovat s hladinami v obou nádobách nezávisle na sobě. Zajištění vícerozměrnosti soustavy bylo dosaženo uzavřením vzduchových objemů nad hladinami a jejich následným propojením.

Schéma propojení uzavřeného vzduchového objemu nad hladinou je na Obr. 3

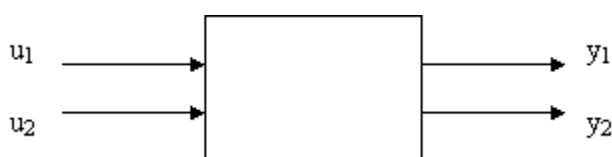


Obr. 3 - Vzdušník laboratorního modelu [Dušek, F., Honc, D. 2004]

Celkový objem vzdušníku se dělí na hydraulický prostor (nádoba s konstantním průřezem S a výšce H), kde se mění výška hladina h v závislosti na přítoku kapaliny a na pneumatický prostor, který je tvořen konstantním objemem V_0 a tlakem p závislým na výšce hladiny. Při změnách výšky hladiny h dochází ke změnám tlaku p a k průtoku (hmotnostní průtok Q_0) vzduchu clonou ven nebo dovnitř pneumatického prostoru. Dokud se tlak p nevyrovná s atmosférickým tlakem p_A , jsou tlakem p zpětně ovlivňovány všechny hladiny v nádobách a dochází k neobvyklému chování (v ustáleném stavu mají křížové vazby nulové zesílení). [Dušek, F., Honc, D. 2004]

1.3 Vazby laboratorního modelu

Pneumatické obvody tvoří vazbu na rozdíl od hydraulických, přes kterou se navzájem dva hydraulické obvody ovlivňují. Výsledkem je dvourozměrná soustava s vnitřními interakcemi, jejichž velikost lze nastavit velikostí clon u pneumatických nádob. Pomocí příkonu čerpadel se ovládají průtoky vody v obou větvích, které představují akční členy. Přes výměnné clonky jsou pneumatické nádoby propojeny s vnější atmosférou. Hladiny ve spodních nádobách se měří diferenčními snímači tlaku TMDG 568 Z3F od firmy Cressto.



Obr. 4 - Blokové schéma úlohy

Akční veličiny u_1, u_2 – jsou ve dvou paralelních větvích průtoky vody. Oba průtoky jsou v rozsahu 0 až 10 V, které ovládají výkon čerpadel přes výkonové členy. Ovládací jednotce je vstupní napětí převedeno na rozsah 4 až 10 V.

Regulované veličiny y_1, y_2 – jsou ve spodních nádržích výšky hladiny. Výstupní signály jsou v rozsahu 0 až 10 V pro výšku hladin v rozmezí 0 až 30 cm.

Vazba mezi obvody – jsou nastaveny připojením pneumatických nádob ručními ventily a velikostí clon, které s vnější atmosférou propojují nádoby.

Propojení s počítačem – je pomocí 2 vstupních a 2 výstupních napětí propojena přes sériovou linku s využitím CTRL jednotky, doplněná programovým vybavením pro práci v prostředí MATLAB. Je tak možné používat akviziční kartu s podporou RT toolbox.

[KLEČKA, R., MAHDAL, M., 2007]

1.4 Elektronická ovládací jednotka laboratorního modelu

Elektronická ovládací jednotka modelu má zdroj napětí pro napájení snímačů tlaku a výkonový člen pro ovládání čerpadla. Byla navržena a vyrobena na Katedře řízení procesů a výpočetní techniky na univerzitě v Pardubicích. Napájení ovládací jednotky je zajištěno ze zdroje 12V/5A. Pro funkci jednotky je vyrobeno zbylé napětí z napájecího zdroje. Na horním panelu jednotky jsou tři svítivé diody pro správnou funkci všech zdrojů. Žlutá dioda znamená přítomnost napájecího napětí zdroje, zelená a červená dioda znamená správnou funkci zdroje symetrického napětí pro napájení elektroniky jednotky.

Ovládací jednotku lze vidět na Obr. 5. Na zadním panelu jednotky jsou umístěny rozebíratelné konektory, pro připojení akčních členů modelu a snímačů. Do zásuvné svorkovnice jsou připojeny akční členy na zadním panelu. Plochým kabelem do konektorů RJ45 jsou připojeny snímače tlaku. Odpojení zdroje ovládací jednotky je vypínač umístěn na zadním panelu. Nedílnou součástí napájecího zdroje je souosý konektor, který je připojen ke zdroji.

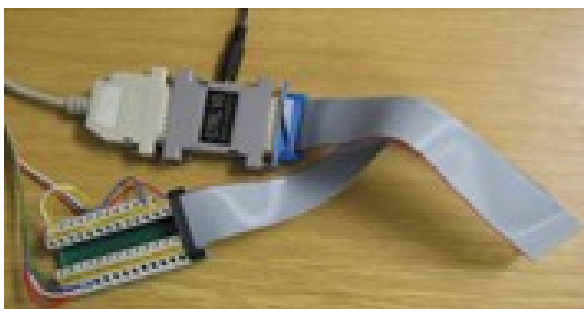


Obr. 5 - Elektronická ovládací jednotka

Při použití jiného zdroje napájení, než je zdroj dodávaný s modelem, je nutno zachovat příslušnou napájecí polaritu konektoru. Připojení ovládacích napětí akčních členů je konektor umístěn na předním panelu a také i propojení výstupu měřených napětí ze snímačů měřených veličin. [KLEČKA, R., MAHDAL, M, 2007]

1.5 Popis jednotky CTRL V3

Jednotka CTRL V3 má 4 logické vstupy a výstupy, 4 analogové vstupy (0 – 10V), 2 analogové výstupy (0 – 10V, 50mA) při 9-bitovém rozlišení. Logické vstupy mají možnost přímého ovládání 12V relé. Jednotka je umístěna mezi dvěma konektory CANON 25 v plastovém krytu. Jeden konektor je signálový a druhý pro sériovou linku, která je opto-elektricky oddělená. Po připojení k počítači není nutné instalovat žádné ovladače. Pro usnadnění připojení vnějšího zařízení je možné k signálovému konektoru připojit speciální svorkovnici. Jednotka CTRL V3 je napájena z univerzálního nestabilizovaného 12V zdroje (min 300mA). K počítači můžeme jednotku připojit přes USB port pomocí převodního konektoru USB/RS232, ale musí se použít zvláštní ovladač.

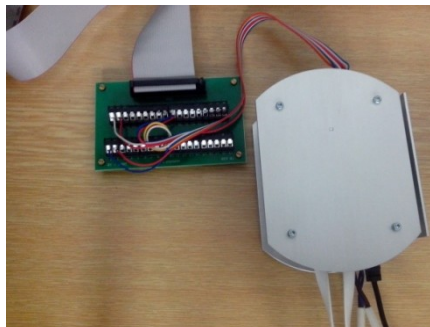


Obr. 6 - Jednotka CTRL V3 se svorkovnicí

Jednotka CTRL V3 je v činnosti ihned po zapojení do sériového portu počítače. Jednotka nám umožňuje měření a vysílání analogových i logických signálů, posílání obrazu vstupu a výstupu periodicky, čímž vytváří reálný čas pro MATLAB 6. [KLEČKA, R., MAHDAL, M, 2007]

Při návrhu aplikace pro řízení laboratorního modelu byla jednotka CTRL V3 nahrazena měřicí kartou MF634 od firmy HUMUSOFT. Tato karta je podporována produktem Real-Time Windows Target a xPC Target pro MATLAB. V aplikaci se využívá první zmíněný produkt, který definuje různé funkční bloky v prostředí Simulink. Karta disponuje 8 analogovými vstupy/výstupy, 8 digitálními vstupy/výstupy, krátkou dobou převodu, nízkou spotřebou a dalšími technickými parametry. Karta je připojena

v PC pomocí PCI express sběrnice. Svorkovnice vyvedená z karty slouží k propojení s ovládací jednotkou laboratorního modelu.

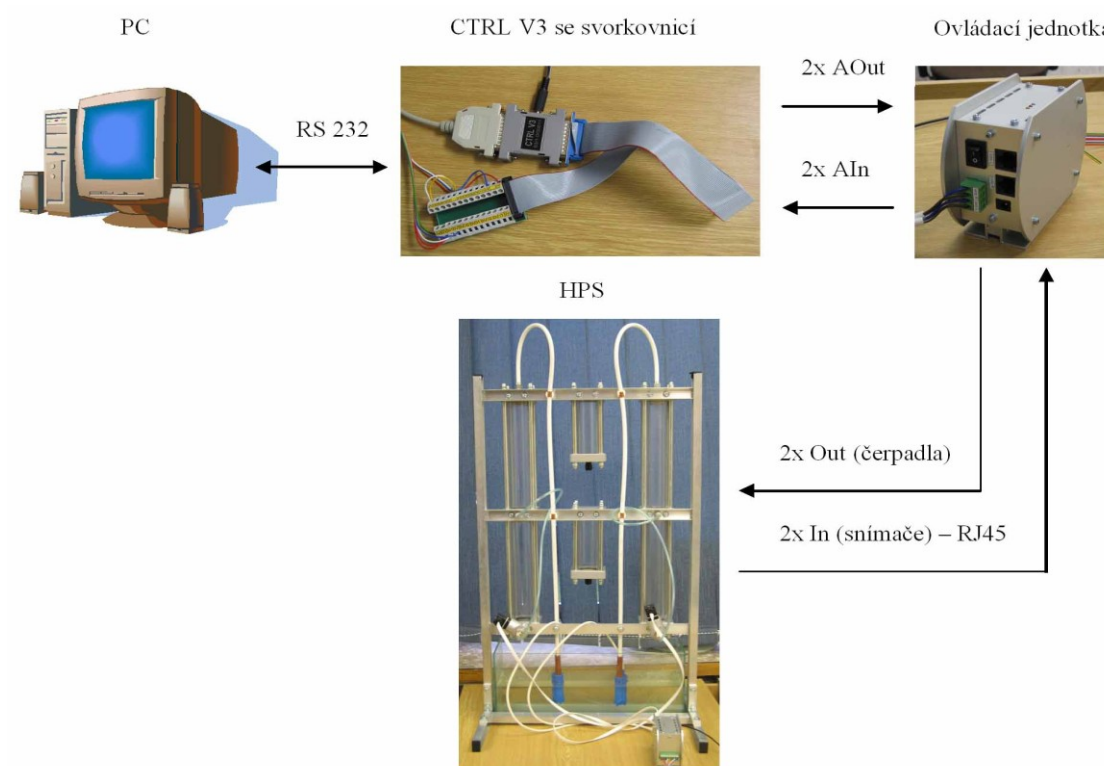


Obr. 7 - Svorkovnice karty MF634 propojená s ovládací jednotkou

1.6 Propojení laboratorního modelu s počítačem

Pro propojení laboratorního modelu s počítačem a nastavení zvolené úlohy se síťovým vypínačem se zapne ovládací jednotka s elektronickými obvody. Tím je úloha připravena k provozu. Ovládání a měření se provádí pomocí počítače a závisí na použitém druhu spojení.

[KLEČKA, R., MAHDAL, M., 2007]



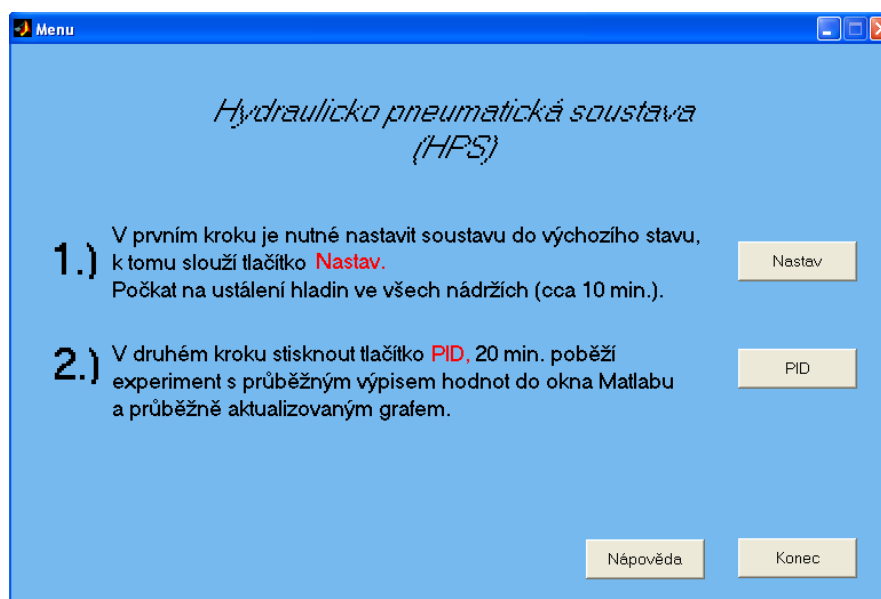
Obr. 8 - Realizace propojení laboratorního modelu s počítačem [KLEČKA, R. & MAHDAL, M., 2007]

1.7 Aplikace pro měření na modelu

Měření na laboratorním modelu lze provádět pomocí aplikace vytvořené v programu MATLAB. Experiment se skládá ze dvou částí, a to kalibrací soustavy (měření přechodové charakteristiky s pevně danými parametry) a regulaci výšky hladiny (s nastavitelnými parametry PID regulátorů). Kalibrace trvá 10 minut a poté lze zapnout v obou nádržích regulace hladin pomocí PID regulátorů trvající také 20 minut.

Postup při měření

- 1) Připojení CTRL V3 na COM1 a připojit elektronickou ovládací jednotku k laboratornímu modelu.
- 2) Připojit k CTRL V3 napájecí napětí a zapnout elektronickou ovládací jednotku.
- 3) Spuštění programu MATLAB a nastavit pracovní adresář.
- 4) V programu MATLAB otevřít m-soubor nastav.m a spustit (tím se nastaví 6 V na levé a 5 V na pravé čerpadlo).
- 5) Po 10 minutách by se měli ustálit hladiny v obou nádržích.
- 6) V programu MATLAB otevřít m-soubor PCH_PID.m (nebo PCH_PID7.m). Měření potrvá 20 min s průběžným výpisem hodnot do programu MATLAB a vykreslovaným grafem aktualizovaným periodou měření $T_s = 2s$. Doba jednotlivého měření je $T = 600 s$.



Obr. 9 - Grafické rozhraní pro ovládání soustavy [KLEČKA, R. & MAHDAL, M., 2007]

Původní aplikace vytvořená pro ovládání modelu se skládala z jednoho uživatelského okna viz. Obr. 9 a m-souborů s pevně nastavenými parametry. Doba experimentu s nastavením soustavy a samotnou PID regulací trvala cca 30 minut, což je pro pravidelná měření nepraktické. Parametry regulátorů nemohl uživatel měnit, pokud nebyl dostatečně seznámen s tvorbou aplikací v programu MATLAB, proto byla aplikace pro experimentální měření téměř nevyužitelná.

2 Tvorba aplikací v programu MATLAB

Všechny grafické objekty při tvorbě aplikace tvoří *grafické uživatelské prostředí*. V angličtině se pro toto prostředí používá zkratka GUI (Graphical User Interface). V programu MATLAB lze vytvářet grafické objekty dvěma způsoby, a to uživatel si je může vytvářet sám v editoru zdrojových textů nebo pomocí nástroje, který všechny grafické prvky vytvoří za něj. Tento nástroj je v systému MATLAB integrován pod názvem GUIDE (Graphical User Interface Development Environment). Po spuštění GUIDE uživatele provádí interaktivním způsobem, grafické objekty si lze vybírat myší a poté umisťovat a zadávat jejich parametry. Jde o řešení univerzální a časově nenáročné, ale přes všechny výhody, lze najít i jisté nevhodné vlastnosti. Jde zejména o to, že výsledný kód nemusí a často ani není optimální, což je daň za univerzálnost řešení. Systém GUIDE produkuje delší zdrojové texty a také poněkud odlišnou strukturu celého kódu, na níž si musí uživatel zvyknout. Předností je pak skutečnost, že si nemusí uživatel pamatovat jednotlivé parametry grafických objektů. [ZAPLATÍLEK, K., DOŇAR, B., 2004]

2.1 Základní atributy tvorby grafického uživatelského rozhraní

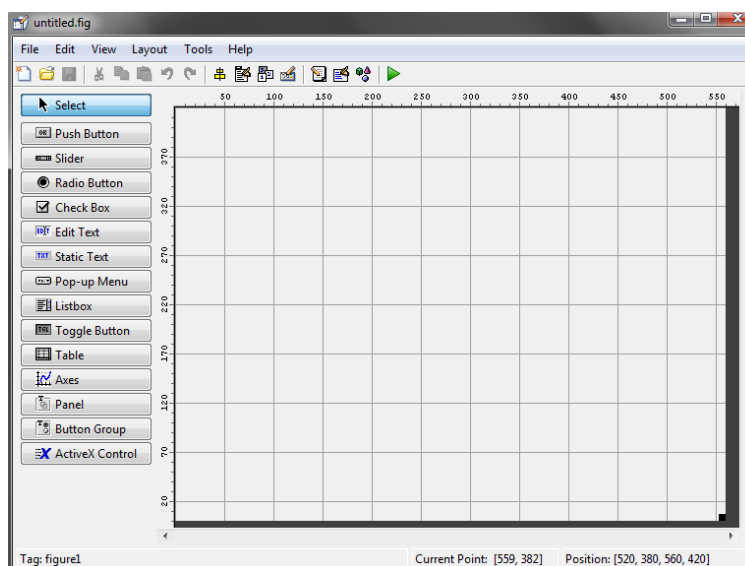
Při tvorbě grafického uživatelského rozhraní je třeba uvažovat nad ulehčením ovládání aplikace uživatelem. To vyžaduje, aby byly splněny během celého běhu programu základní požadavky

- **JEDNODUCHOST** (robustnost),
pohyb v aplikaci by měl být jednoduchý a rychlý
- **PROVÁZANOST** (vždy musí být zajištěn návrat),
uživatel se v aplikaci nesmí při řízení jejího běhu ztratit nebo se dostat do slepé uličky bez návratu, tedy
 - uživatel by měl vědět, kde se právě nachází
 - uživatel by měl vědět, jaký je další krok
- **KOMPLEXNOST** (vždy musí být zajištěn návrat),
uživatel by měl mít možnost vrátit se vždy na začátek.

[ZAPLATÍLEK, K., DOŇAR, B, 2004]

2.2 Prostředí GUIDE

Průvodce tvorbou GUI (GUIDE) je grafické interaktivní vývojové prostředí, obsahující všechny grafické objekty typu uicontrol, kterými je možné ovládat běh aplikace. Vzhled vytvořeného GUI ukládá GUIDE do souboru s příponou *.fig a jeho zdrojový kód do souboru *.m.

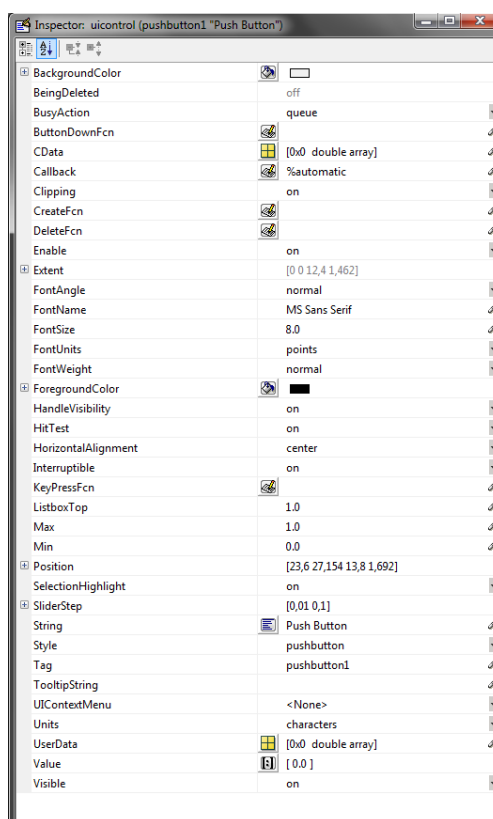


Obr. 10 - Vývojové prostředí GUIDE v programu MATLAB

Toto prostředí jde vyvolat dvěma způsoby, a to napsáním příkazu *guide* v Command Window nebo základním menu *File/New/GUI*. V tomto prostředí lze vkládat a editovat komponenty jako třeba tlačítka, textová pole, zaškrtávací pole, rozbalovací menu, posuvníky, grafy a další. Kromě vkládání komponent jsou v prostředí GUIDE ještě další nástroje

Layout Editor	přidání a základní uspořádání objektů v okně návrhu,
Alignment Tool	zarovnání a rozmístění objektů s ohledem na různé části návrhu,
Property Inspektor	nastavení hodnot objektů a dohled nad nimi,
Object Browser	sledování hierarchické struktury Handle Graphics objektů v příslušné sekci MATLAB,
Menu Editor	vytváří menu.

Pro nastavení jednotlivých vlastností u komponent se používá Property Inspector. Lze v něm nastavovat např. font, barvu, zarovnání, velikost písma nebo přiřadit funkci dané komponentě. Složitější funkce lze programovat u jednotlivých komponent ve zdrojovém kódu m – souboru pro danou GUI aplikaci. [ZAPLATÍLEK, K., DOŇAR, B, 2004]



Obr. 11 - Property Inspector pro push button

3 Mnohorozměrné regulační obvody

Mnohorozměrné regulační obvody jsou soustavy s více vstupními a výstupními veličinami, které se označují jako systémy s více vstupy a výstupy (Multi-Input Multi-Output systems, tzv. MIMO systémy), nebo také vícerozměrné systémy (Multivariable Systems). Každá vstupní veličina je schopna ovlivňovat více výstupních veličin, díky této interakci vznikají složité dynamické souvislosti a vazby. U mnohorozměrné soustavy jsou všechny veličiny obvodu vektory, které procházejí přenosovou maticí regulátoru a přenosovou maticí soustavy.

Vstupní veličina mnohorozměrné soustavy je akční veličina u_i ($i=1,2,\dots, n$), která uskutečňuje řízení veličiny výstupní y_i ($i=1,2,\dots, m$).



Obr. 12 - Mnohorozměrná regulovaná soustava

Vztahy mezi veličinami mnohorozměrné soustavy jsou popsány maticemi.

Přenosová matice G_S

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}_S \mathbf{u}$$

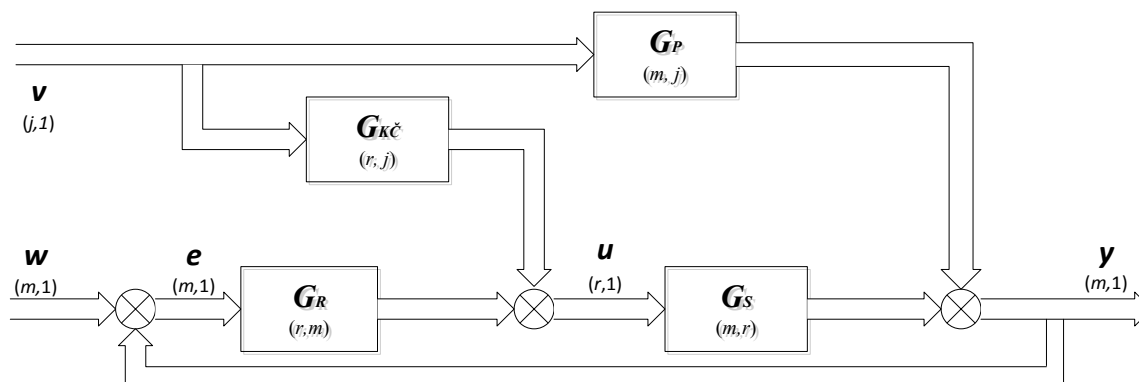
$$\mathbf{G}_S = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{m1} & G_{m2} & \dots & G_{mn} \end{bmatrix}$$

Vektory vstupní a výstupní veličiny

$$\mathbf{u}(s) = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{y}(s) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

Na mnohorozměrné soustavy působí větší počet akčních veličin, které jsou regulovanými veličinami různě vázány. Většinou musíme k regulaci soustavy použít větší počet regulátorů. Lineární mnohorozměrné regulační obvody můžeme rozdělit na

- spojité
- diskrétní



Obr. 13- Mnohorozměrný regulační obvod s měřením poruch

Na Obr. 13 znamená

w – vektor žádané veličiny o rozměru $(m,1)$

e – vektor regulačních odchylek o rozměru $(m,1)$

u – vektor akční veličiny o rozměru $(r,1)$

v – vektor poruchové veličiny o rozměru $(j,1)$

y – vektor výstupní veličiny o rozměru $(m,1)$

G_R – přenosová matice regulátoru o dimenzi (r,m)

G_S – přenosová matice soustavy o dimenzi (m,r)

G_{KC} – přenosová matice korekčního členu o dimenzi (r,j)

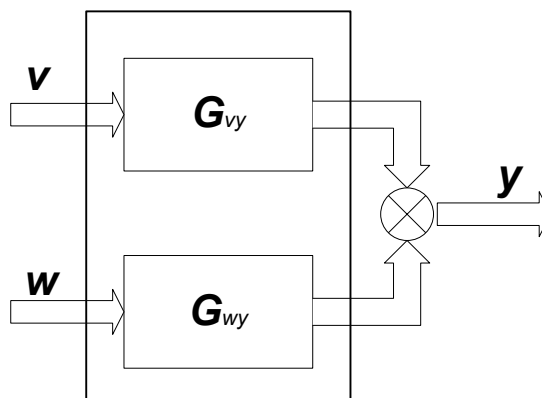
G_P – přenosová matice poruchy o dimenzi (m,j)

Podmínka regulovatelnosti je splněna, pokud je počet akčních veličin nejméně tak velký, jako je počet regulovaných veličin $r \geq m$.

Schéma mnohorozměrného regulačního obvodu z obr. 13 lze z hlediska cíle regulace zobrazit jednodušeji.

a) Cíl regulace ve tvaru

$$\mathbf{y}(t) \rightarrow \mathbf{w}(t) \triangleq \mathbf{y} \rightarrow \mathbf{w}$$



Obr. 14 - Mnohorozměrný regulační obvod popsáný přenosovou maticí řízení a poruchy

Vztah pro regulovanou veličinu bude

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}_{vy}\mathbf{v} + \mathbf{G}_{wy}\mathbf{w},$$

kde

$$\mathbf{G}_{wy} = (\mathbf{I} + \mathbf{G}_S\mathbf{G}_R)^{-1}\mathbf{G}_S\mathbf{G}_R$$

je přenosová matice řízení a

$$\mathbf{G}_{vy} = (\mathbf{I} + \mathbf{G}_S\mathbf{G}_R)^{-1}(\mathbf{G}_P - \mathbf{G}_S\mathbf{G}_{KČ})$$

je přenosová matice poruchy.

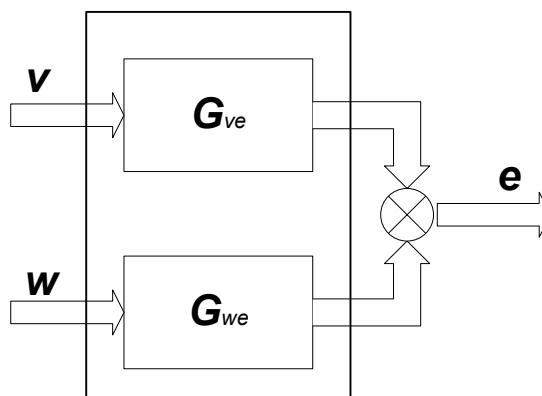
Aby cíl regulace byl splněn pro jakoukoliv žádanou veličinu \mathbf{w} a poruchu \mathbf{v} , musí být splněny následující podmínky

$$\mathbf{G}_{wy} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_{vy} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

První podmínka pro přenosovou matici řízení nám vyjadřuje funkci regulátoru, která spočívá ve sledování žádané veličiny \mathbf{w} regulovanou veličinu \mathbf{y} . Druhá podmínka pro přenosovou matici poruchy nám vyjadřuje funkci regulátoru, která spočívá v potlačení poruchové veličiny \mathbf{v} na činnost regulačního obvodu. [ŠULC, B., VÍTEČKOVÁ, M., 2004]

b) Cíl regulace ve tvaru

$$e(t) \rightarrow 0 \cong e \rightarrow 0$$



Obr. 15 - Mnohorozměrný regulační obvod popsáný odchylkovým přenosem řízení a poruchy

Vztah pro regulační odchylku bude

$$e = G_{ve} v + G_{we} w,$$

kde

$$G_{we} = (I + G_S G_R)^{-1}$$

je odchylková přenosová matice řízení a

$$G_{ve} = -(I + G_S G_R)^{-1} (G_P - G_S G_{KČ})$$

je odchylková přenosová matice poruchy.

Aby cíl regulace byl splněn pro jakoukoliv žádanou veličinu w a poruchu v , musí být splněny následující podmínky

$$G_{we} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad G_{ve} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Stejně jako v předcházejícím případě první podmínka pro odchylkovou přenosovou matici řízení vyjadřuje funkci regulátoru spočívající v zajištění sledování žádané veličiny w regulovanou veličinu y . Druhá podmínka pro odchylkovou přenosovou matici poruchy nám vyjadřuje funkci regulátoru spočívající v potlačení vlivu na poruchové veličiny v na činnost regulačního obvodu. Ze srovnání všech vztahů vyplývá, že obě formulace cíle regulace jsou vzájemně ekvivalentní, Proto budeme dále uvažovat cíl regulace a . [ŠULC, B., VÍTEČKOVÁ, M., 2004]

3.1 Stabilita mnohorozměrných regulačních obvodů

Stabilita regulačního obvodu je definována jako jeho schopnost ustálit všechny veličiny na konečných hodnotách, pokud se vstupní veličiny ustálí na konečných hodnotách. Vstupními veličinami u regulačního obvodu jsou žádaná veličina w a všechny poruchové veličiny, nejčastěji agregované do jediné poruchové veličiny v . Regulační obvod je stabilní, když omezeným vstupům odpovídají omezené výstupy.

$$(I + G_S G_R)^{-1} = \frac{\text{adj}(I + G_S G_R)}{\det(I + G_S G_R)}$$

O stabilitě systému rozhoduje determinant, jehož číselník je zároveň charakteristickým mnohočlenem regulačního obvodu.

$$\det(I + G_S G_R) = \frac{N(s)}{M(s)}$$

Charakteristický mnohočlen vystupuje u každého základního přenosu regulačního obvodu a je současně charakteristický mnohočlen příslušné diferenciální rovnice popisující regulační obvod. Nutná a postačující podmínka stability řešení diferenciální rovnice je, aby kořeny s_1, s_2, \dots, s_n jejího charakteristického mnohočlenu (příp. její charakteristické rovnice)

$$N(s) = a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0 = a_n (s - s_1)(s - s_2) \dots (s - s_n)$$

měly zápornou reálnou část, tj.

$$\text{Re } s_i < 0, \text{ pro } i = 1, 2, \dots, n.$$

Podmínka zápornosti reálných částí kořenů charakteristického mnohočlenu regulačního obvodu nebo ekvivalentně kořenů charakteristické rovnice regulačního obvodu je nutnou a postačující podmínkou (asymptotické) stability daného regulačního obvodu.

Při výpočtu charakteristické rovnice regulačního obvodu vzniká z charakteristického mnohočlenu položením rovno nule. K ověření stability se tato rovnice kontroluje **Stodolovou nutnou podmínkou stability**, která zní „Všechny koeficienty charakteristické rovnice musí existovat a musí mít stejné znaménko“, tzn. $a_i > 0$; $i = 0, 1, \dots, n$. Pokud je charakteristický mnohočlen řádu $n \leq 2$, nutná Stodolova podmínka přechází v nutnou a postačující podmínku stability. Po kontrole Stodolovou podmínkou se přechází na výpočet dle daného kritéria stability.

[VÍTEČEK, A., VÍTEČKOVÁ, M. 2008]

3.2 Autonomnost a invariantnost

Při syntéze mnohorozměrného regulačního obvodu často požadujeme:

1. Aby jedna žádaná veličina způsobovala změnu pouze jediné odpovídající (vlastní) regulované veličiny. Takový regulační obvod označujeme jako *autonomní*.
2. Aby byl odstraněn vliv poruchových veličin na regulované veličiny. Takový regulační obvod nazýváme *invariantním*. Regulační obvody, u kterých je vliv poruch na regulované veličiny odstraněn úplně, nazýváme jako *absolutně invariantní*; obvody ve kterých je vliv poruchových veličin odstraněn jen částečně (např. jen v ustáleném stavu), nazýváme *přibližně invariantním*, často též jako „invariantní do ε “, kde ε je chyba, která vzniká neúplným odstraněním vlivu poruch.

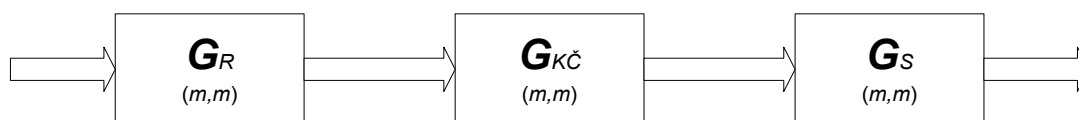
Zjištění autonomnosti realizujeme maticovým regulátorem \mathbf{G}_R uzavřeného mnohorozměrného regulačního obvodu. Pro zajištění invariantnosti používáme přenosové matice korekčního členu $\mathbf{G}_{K\check{C}}$ v mnohorozměrném regulačním obvodu s měřením poruchy.

Podmínka autonomnosti

Má-li být řídicí obvod autonomní, tj. má-li žádaná veličina w_i ovlivňovat jen výstupní veličinu y_i ($i=1, 2, \dots, m$), musí být matice přenosu otevřeného regulačního obvodu \mathbf{G}_o diagonální, a to znamená, že i matice \mathbf{G}_{wy} je také diagonální a podmínka autonomnosti je splněna. Autonomnost zhoršuje dynamiku systému a lze realizovat pouze v ustáleném stavu. Dosažení autonomnosti vede k diagonální struktuře matice \mathbf{G}_o .

$$\mathbf{G}_o = \begin{bmatrix} G_{S11}G_{R11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G_{S22}G_{R22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & G_{Smm}G_{Rmm} \end{bmatrix}$$

Přenosová matice řízení \mathbf{G}_{wy} i přenosová matice poruch \mathbf{G}_{vy} musí být diagonální. Autonomnost systému zajistíme vložení korekčního členu $\mathbf{G}_{K\check{C}}$.



Obr. 16 - Vložení korekčního členu do systému

Matice regulátoru a korekčního členu volíme tak, aby jejich součin s regulovanou soustavou byl diagonální.

$$\mathbf{G}_o = \mathbf{G}_S \mathbf{G}_{K\check{C}} \mathbf{G}_R \Rightarrow \text{diagonální}$$

Matici regulátoru G_R volíme diagonální, a proto nám stačí, aby součin matic $G_S G_{K\check{C}}$ byl diagonální. Pro dvojrozměrný regulační obvod máme dvě rovnice pro čtyři neznámé prvky korekční matice, proto volíme u $G_{K\check{C}}$ na hlavní diagonále jedničky, aby se záporná zpětná vazba nezměnila v kladnou.

Ukázka výpočtu koeficientů korekční matice z jednotlivých přenosových matic pro dvourozměrný regulační obvod

$$G_S = \begin{bmatrix} G_{S11} & G_{S12} \\ G_{S21} & G_{S22} \end{bmatrix}, \quad G_{K\check{C}} = \begin{bmatrix} G_{K\check{C}11} & G_{K\check{C}12} \\ G_{K\check{C}21} & G_{K\check{C}22} \end{bmatrix}$$

volíme

$$G_{K\check{C}} = \begin{bmatrix} 1 & G_{K\check{C}12} \\ G_{K\check{C}21} & 1 \end{bmatrix},$$

pak nám součin matic vyjde

$$G_S G_{K\check{C}} = \begin{bmatrix} G_{S11} & G_{S12} \\ G_{S21} & G_{S22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & G_{K\check{C}12} \\ G_{K\check{C}21} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{S11} + G_{S12} G_{K\check{C}21} & G_{S11} G_{K\check{C}12} + G_{S12} \\ G_{S21} + G_{S22} G_{K\check{C}21} & G_{S21} G_{K\check{C}12} + G_{S22} \end{bmatrix}.$$

Jelikož výsledek této matice má být diagonální, platí

$$G_{S11} G_{K\check{C}12} + G_{S12} = 0 \Rightarrow G_{K\check{C}12} = -\frac{G_{S12}}{G_{S11}},$$

$$G_{S21} + G_{S22} G_{K\check{C}21} = 0 \Rightarrow G_{K\check{C}21} = -\frac{G_{S21}}{G_{S22}},$$

potom má matice korekčního členu tvar

$$G_{K\check{C}} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{S12}}{G_{S11}} \\ -\frac{G_{S21}}{G_{S22}} & 1 \end{bmatrix}.$$

Plná autonomnost způsobuje problémy s fyzikální realizovatelností, proto se v praxi nepoužívá.

Částečná autonomnost

$$|G_{oij}| = \varepsilon, \quad i \neq j$$

Autonomnost v ustáleném stavu

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{oij}(s) = 0, \quad i \neq j$$

Podmínka invariantnosti

K zajištění absolutní invariantnosti je potřeba, aby matice G_{vy} byla nulová, to je možné tehdy, je-li

$$[G_P - G_S G_{K\check{C}}] = 0$$

tj., je-li

$$G_{K\check{C}} = G_S^{-1} G_P$$

čímž je podmínka invariantnosti splněna.

Částečná invariantnost

$$\|G_P - G_s G_{K\check{C}}\| \leq \varepsilon$$

Invariantnost v ustáleném stavu

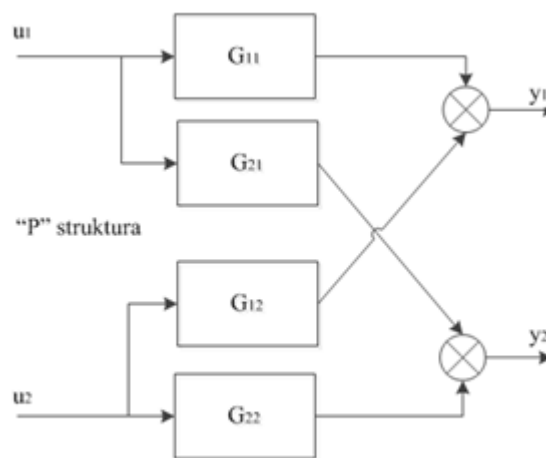
$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{K\check{C}}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} [G_s^{-1}(s) G_P(s)]$$

[BALÁTE J., 2003]

3.3 Dvourozměrné systémy

Dvourozměrné systémy patří k nejjednodušším a nejrozšířenějším mnohorozměrným obvodům, jsou to systémy s dvěma vstupy a dvěma výstupy.

Vnitřní struktura dvourozměrného systému je popsána pomocí jednotlivých jednorozměrných přenosů, které určují vztahy mezi veličinami systému. Tyto jednorozměrné přenosy jsou příčinou komplikací se vzájemnou interakcí, a proto se nazývají parazitní. Dvourozměrné systémy mají dvě různé struktury, a to “P” strukturu a “V” strukturu.



Obr. 17 - Schéma struktury "P"

Ve schématu struktury P se nachází dvě regulované veličiny se dvěma akčními veličinami, které lze matematicky popsat přenosovými rovnicemi

$$y_1 = G_{11}u_1 + G_{12}u_2 ,$$

$$y_2 = G_{21}u_1 + G_{22}u_2 .$$

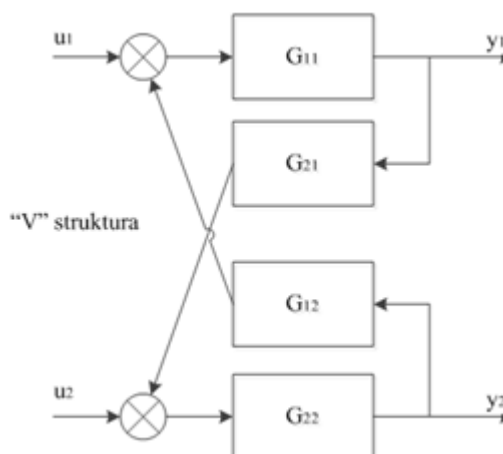
Tuto soustavu rovnic lze popsat jedinou vektorově-maticovou rovnicí

$$\mathbf{y} = \mathbf{G} \mathbf{u} .$$

Vzniklá přenosová matice pro soustavu se dvěma vstupy a výstupy odpovídá tzv. P struktuře. Ta je nejbližší přirozenému svorkovému chápání přenosových bloků, protože pro vyjádření vztahu mezi každou ze vstupních a výstupních proměnných má přímo definovány přenosové funkce. P struktura je přednostně využívána při syntéze regulačních obvodů, kde umožňuje názornou formulaci problému autonomnosti.

Ve speciálních úlohách řešení problematiky MIMO systémů se lze setkat s V strukturou. Jestliže u P struktury byla charakteristickým znakem „dopředná“ (od vstupu k výstupům) orientace všech přenosů, u V struktury je tato orientace zachována pouze u hlavních (diagonálních) přenosů. Každý „mimodiagonální“ výstup je s příslušným přenosem „zpětnovazebně“ napojen na všechny vstupy, s nimiž nevytváří diagonální dvojici. V strukturu lze vytvářet pouze pro systémy se stejným počtem vstupů jako výstupů, tj. pro systémy, jejichž P struktura je popsána čtvercovou přenosovou maticí.

[ŠULC, B., VÍTEČKOVÁ, M., 2004]



Obr. 18 - Schéma struktury "V"

Matematický popis V struktury.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 \\ 0 & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & G_{12} \\ G_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$$

Vektorově-maticový zápis umožňuje zjistit vzájemnou korespondenci s P strukturou. Za použití vektorů a symbolu \mathbf{G}_D pro matici obsahující pouze diagonální prvky a symbolu \mathbf{G}_N pro matici s nulami na diagonále doplněnou zbývajících přenosy, tyto matice lze vyjádřit

$$\mathbf{G}_D = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 \\ 0 & G_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_N = \begin{bmatrix} 0 & G_{12} \\ G_{21} & 0 \end{bmatrix}$$

zápis předchozí rovnice se tedy změni na

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}_D \mathbf{u} + \mathbf{G}_D \mathbf{G}_N \mathbf{y},$$

z níž za předpokladu proveditelnosti inverze lze vyjádřit vztah mezi \mathbf{u} a \mathbf{y}

$$\mathbf{y} = (\mathbf{I} - \mathbf{G}_D \mathbf{G}_N)^{-1} \mathbf{G}_D \mathbf{u} \text{ nebo } \mathbf{y} = \mathbf{P} \mathbf{u}, \quad \mathbf{P} = (\mathbf{I} - \mathbf{G}_D \mathbf{G}_N)^{-1} \mathbf{G}_D,$$

kde symbolem \mathbf{P} je označena přenosová matice P struktury.

Je ovšem možný i převod opačný – k dané P struktuře přiřadit V strukturu. Výsledek nebude ovšem jednoznačný. Základem tohoto převodu je dekompozice přenosové matice na dvě matice, matici \mathbf{P}_D tvořenou pouze prvky na diagonále \mathbf{P} a matici \mathbf{P}_N , kterou tvoří prvky zbývající. S ohledem na možnost vyjádřit vektor \mathbf{u} , platí

$$\mathbf{u} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{y},$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{P} \mathbf{u} = \mathbf{P}_D \mathbf{u} + \mathbf{P}_N \mathbf{u} = \mathbf{P}_D (\mathbf{u} + \mathbf{P}_D^{-1} \mathbf{P}_N \mathbf{u}) = \mathbf{P}_D (\mathbf{u} + \mathbf{P}_D^{-1} \mathbf{P}_N \mathbf{P}^{-1} \mathbf{y}).$$

Pro soustavy, které mají větší počet vstupních než výstupních veličin, nelze zavést V strukturu. Proto byla definována třetí tzv. H forma, která je hybridní. V ní je ta část soustavy, u níž uvažovaný počet vstupů pokrývá plně počet výstupů, uspořádána do V struktury. Zbývající část je uspořádána do P struktury. [ŠULC, B., VÍTEČKOVÁ, M., 2004]

3.4 Příklad návrhu mnohorozměrného regulátoru

Návrh mnohorozměrného regulátoru si nejdříve ukážeme na příkladu, kdy regulovanou soustavu představuje teplo-vzdušný model. Teplo-vzdušný model je typický dvourozměrný systém, kde jsou dvě řízené a dvě řídicí veličiny. Řízení teploty na termistoru (5mm od žárovky) a proudu vzduchu lze ovlivňovat napětím na žárovce a ventilátoru, což jsou dvě akční veličiny soustavy. Přenosová matice soustavy byla určena z odezvy systému na skokovou změnu akčních veličin

$$\mathbf{G}_S(s) = \begin{bmatrix} G_{S11} & G_{S12} \\ G_{S21} & G_{S22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} & \frac{k_{12}}{T_{12} s + 1} e^{-T_{d1} s} \\ 0 & \frac{k_2}{T_{22} s + 1} e^{-T_{d2} s} \end{bmatrix},$$

kde je

$G_{S11}(s)$ – přenos představující závislost teploty na termistoru a napětím na žárovce,

$G_{S12}(s)$ – přenos představující závislost teploty na termistoru a napětím na ventilátoru,

$G_{S21}(s)$ – přenos představující závislost proudu vzduchu v tunelu na napětí na žárovce,

$G_{S22}(s)$ – přenos představující závislost proudu vzduchu v tunelu na napětí na ventilátoru.

Hodnoty parametrů jsou naměřeny na systému při přivedeném 5V napětí na ventilátor a žárovku.

$$T_1 = 35,8; T_2 = 3,5; T_{12} = 9,95; T_{22} = 3,35; T_{d1} = 2,78; T_{d2} = 3,32$$

$$k_1 = 0,72; k_2 = 1,126; k_{12} = -0,876$$

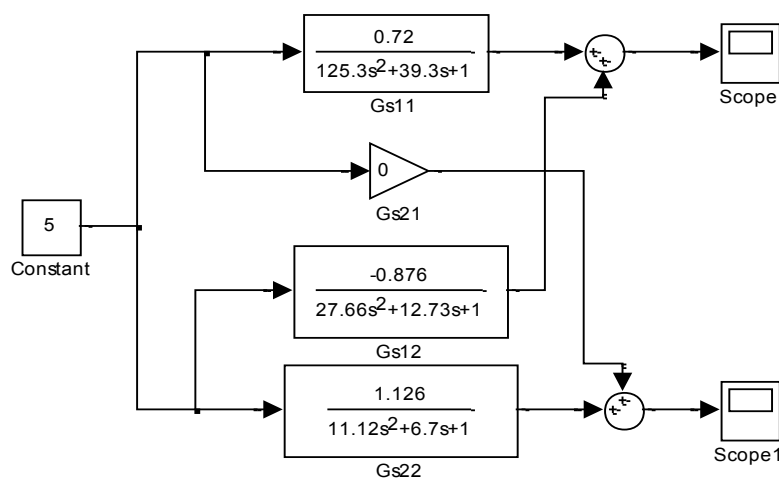
Pro další výpočty a práci s přenosovou maticí teplo-vzdušného modelu jsem zavedl aproximaci za dopravní zpoždění

$$e^x = 1 + x.$$

Výsledná přenosová matice vypadá po úpravě takto

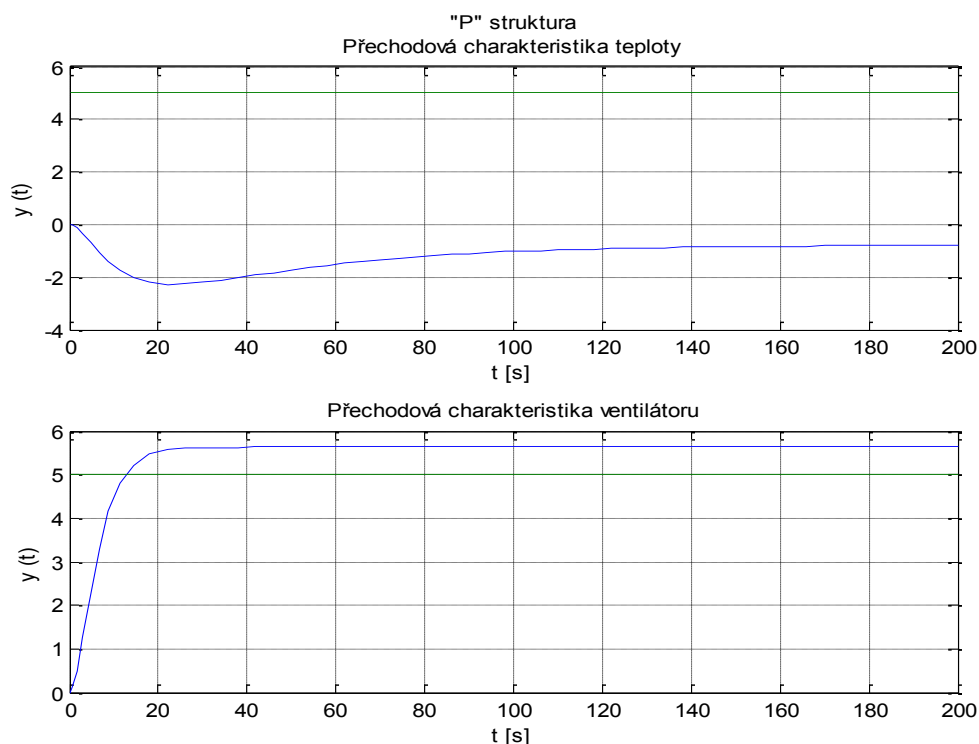
$$\mathbf{G}_S(s) = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} & \frac{k_{12}}{(T_{12}s + 1)(1 + T_{d1}s)} \\ 0 & \frac{k_2}{(T_{22}s + 1)(1 + T_{d2}s)} \end{bmatrix}.$$

Jelikož teplo-vzdušný model představuje typický dvourozměrný systém lze ho modelovat pomocí dvou různých struktur. Jako první si ukážeme model „P“ struktury.



Obr. 19 - Teplo-vzdušný model "P" struktura

Na Obr. 20 lze vidět přechodové charakteristiky teploty a ventilátoru teplo-vzdušného modelu „P“ struktury. Ventilátor reaguje okamžitě na akční veličinu a snaží se přiblížit požadované hodnotě. V průběhu teploty lze vidět okamžité ochlazování ventilátorem a ustálením mimo požadovanou hodnotu.



Obr. 20 - Přechodové charakteristiky teplo-vzdušného modelu "P" struktury

Abychom mohli teplo-vzdušný model modelovat jako "V" strukturu, musíme zajistit převod z „P“ struktury pomocí daných výpočtů, které jsou popsány v předchozí kapitole.

Přenosová matice „P“ struktury

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ 0 & G_{22} \end{bmatrix}.$$

Musíme provést dekompozici přenosové matice na dvě samostatné matice.

$$\mathbf{P}_D = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 \\ 0 & G_{22} \end{bmatrix} \quad a \quad \mathbf{P}_N = \begin{bmatrix} 0 & G_{12} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Pomocí těchto matic můžeme provést převod z „P“ struktury

$$\mathbf{P}_D^{-1} \mathbf{P}_N \mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{G_{11}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{G_{22}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & G_{12} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{G_{11}} & -\frac{G_{12}}{G_{11}G_{22}} \\ 0 & \frac{1}{G_{22}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{G_{12}}{G_{11}G_{22}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Pomocí tohoto výpočtu jsme získali zpětnovazební přenos, který potřebujeme pro realizaci „V“ struktury

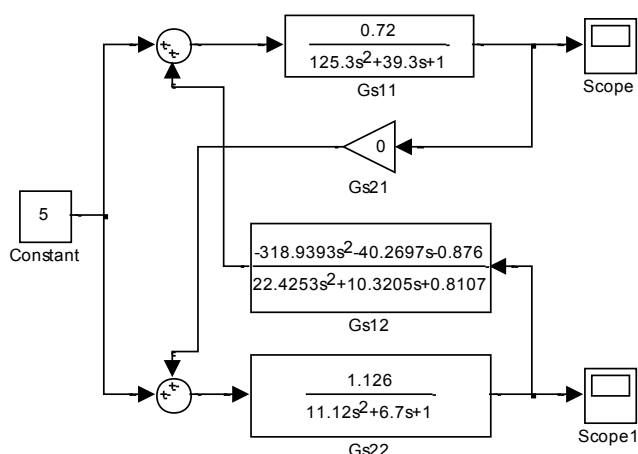
$$G_{S_{12}} = \frac{G_{12}}{G_{11}G_{22}} = \frac{k_{12}}{(T_{12}s + 1)(T_{d1}s + 1)} \frac{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_{22}s + 1)(T_{d2}s + 1)}{k_1k_2},$$

$$G_{S_{12}} = \frac{-0,876 \cdot (35,8s + 1)(3,5s + 1)(3,35s + 1)(3,32s + 1)}{0,72 \cdot 1,126 \cdot (9,95s + 1)(2,78s + 1)}.$$

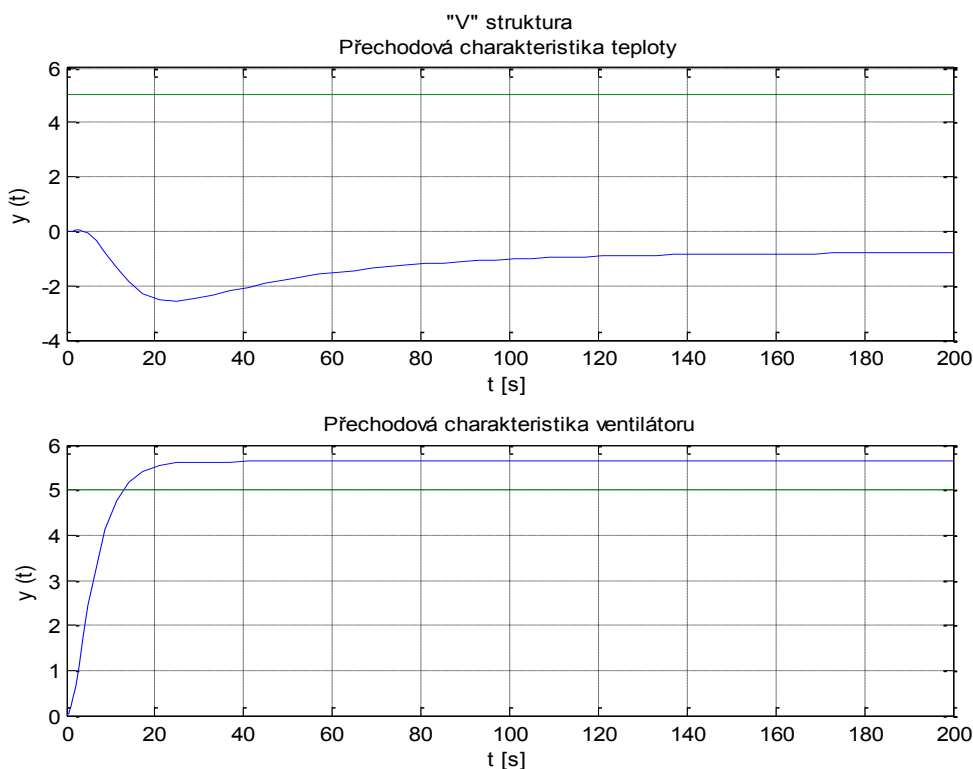
Tento přenos je fyzikálně nerealizovatelný, jelikož má v čitateli vyšší stupeň komplexní proměnné s než ve jmenovateli $n < m$. Tento přenos upravíme na slabě fyzikálně realizovatelný $n=m$ tím, že vytvoříme součtovou konstantu v čitateli

$$G_{s12} = \frac{-0,876 \cdot (35,8s + 1)(10,17s + 1)}{0,72 \cdot 1,126 \cdot (9,95s + 1)(2,78s + 1)}.$$

Po úpravě dostaneme slabě fyzikálně realizovatelný proporcionalní člen se setrvačností 2. řádu. "V" strukturu je možné simulovat, navržený model je na Obr. 21.



Obr. 21 - Teplo-vzdušný model "V" struktura

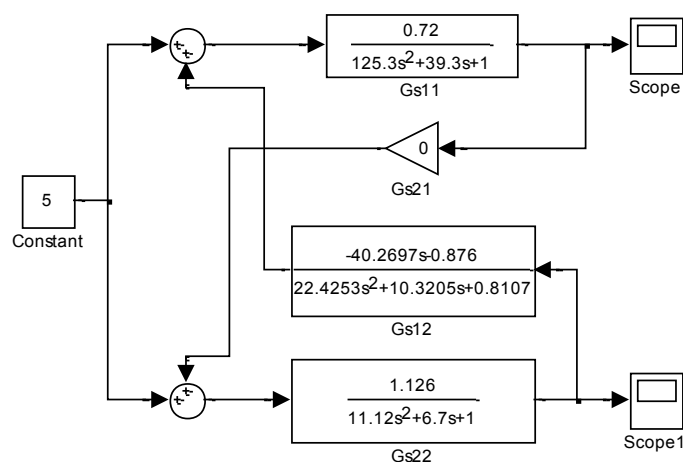


Obr. 22 - Přechodové charakteristiky teplovzdušného modelu "V" struktury

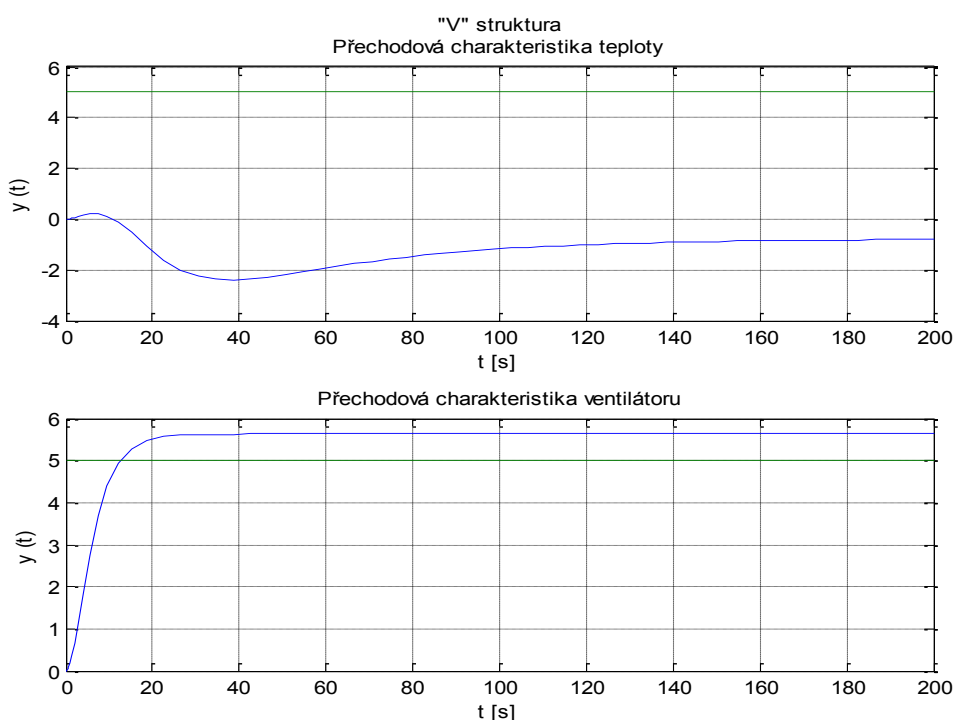
Přechodová charakteristika ventilátoru „V“ struktury (Obr. 22) je stejná jako u „P“ struktury teplo-vzdušného modelu, jelikož přenos ventilátoru není ovlivňován jiným přenosem. Avšak přechodová charakteristika teploty je odlišná od „P“ struktury, což je dáno úpravou zpětnovazebního přenosu G_{S12} . Přenos můžeme ještě upravit na silně fyzikálně realizovatelný $n > m$ opět vytvořením součtové konstanty

$$G_{S12} = \frac{-0,876 \cdot (45,97s + 1)}{0,72 \cdot 1,126 \cdot (9,95s + 1)(2,78s + 1)}.$$

Po úpravě dostáváme silně fyzikálně realizovatelný proporcionální člen se setrvačností 2. řádu.



Obr. 23 - Teplo-vzdušný model "V" struktura



Obr. 24 - Přechodové charakteristiky teplo-vzdušného modelu "V" struktury

Na Obr. 24 zůstává přechodová charakteristika ventilátoru stejná, ale v grafu přechodové charakteristiky teploty s upraveným přenosem nastaly změny. Průběh teploty ze začátku stoupá, po určité době vlivem ventilátoru začne klesat a ustalovat se na stejné hodnotě jako předešlý průběh. Tato změna průběhu teploty je způsobena úpravou přenosu.

Při návrhu regulátoru pro mnohorozměrný systém můžeme postupovat dvěma způsoby:

1. Zanedbáním přenosu G_{S12}

Předpokládáme zjednodušení, a to takové, že zanedbáme přenos $G_{S12}(s)$ a uvažujeme o diagonální přenosové matici soustavy

$$\mathbf{G}_S(s) = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{T_{22}s + 1} e^{-T_{d2}s} \end{bmatrix}.$$

Pro regulaci teploty a proudu vzduchu v tunelu jsou navrženy regulátory typu PI a jejich přenosová matice vypadá takto

$$\mathbf{G}_R(s) = \begin{bmatrix} k_{p1}(1 + \frac{1}{T_{I1}s}) & 0 \\ 0 & k_{p2}(1 + \frac{1}{T_{I2}s}) \end{bmatrix}.$$

Diagonální přenosová matice nám umožňuje přistupovat k mnohorozměrnému regulačnímu obvodu jako ke dvěma jednoduchým regulačním obvodům. Parametry regulátoru můžeme dopočítat pomocí metody optimálního modulu pro přenos $G_{S11}(s)$ a metody požadovaného modelu pro přenos $G_{S22}(s)$.

Metoda optimálního modulu (MOM)

Patří mezi analytické metody seřizování regulátorů a vychází z požadavku na přenos řízení

$$G_{wy}(s) \rightarrow 1 \Rightarrow G_{wy}(j\omega) \rightarrow 1 \Rightarrow A_{wy}(\omega) \rightarrow 1.$$

Tab. 1 - Hodnoty stavitelných parametrů regulátorů pro metodu optimálního modulu

Regulovaná soustava	Regulátor analogový $T=0$; číslicový $T>0$			
	TYP	k_p^*	T_I^*	T_D^*
$\frac{k_1}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$ $T_1 \geq T_2$	PI	$\frac{T_I^*}{2k_1T_2}$	$T_1 - 0,5T$	-

Výpočet parametrů pro regulovanou soustavu $G_{S11}(s)$

$$T_{I1}^* = T_1 - 0,5T = 35,8 - 0,5 \cdot 0 = 35,8,$$

$$k_{p1}^* = \frac{T_{I1}^*}{2k_1T_2} = \frac{35,8}{2 \cdot 0,72 \cdot 3,5} = 7,1.$$

Metoda požadovaného modelu

Tato metoda je popsána v kapitole 4.2 Návrh jednorozměrných regulátorů, kde je použita při návrhu PI regulátoru.

Výpočet parametrů regulátoru pro regulovanou soustavu $G_{S22}(s)$

$$T_{I2}^* = T_{22} - \frac{T}{2} = 3,5 - \frac{0}{2} = 3,5,$$

$$k_{p2}^* = \frac{T_{I2}^*}{(\alpha T + \beta T_d)k_2} = \frac{3,5}{(1,282 \cdot 0 + 2,718 \cdot 3,32)1,126} = 0,33.$$

2. Zajištění autonomnosti

Abychom zajistili autonomnost mnohorozměrného regulačního obvodu, musíme navrhnout korekční člen $\mathbf{G}_{K\check{c}}$, který nám zajistí diagonální přenosovou matici otevřeného regulačního obvodu. Korekční člen je vložen mezi přenosovou matici regulátoru a přenosovou matici soustavy

$$\mathbf{G}_S \mathbf{G}_{K\check{c}} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ 0 & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{S12}}{G_{S11}} \\ -\frac{G_{S21}}{G_{S22}} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 \\ 0 & G_{22} \end{bmatrix}.$$

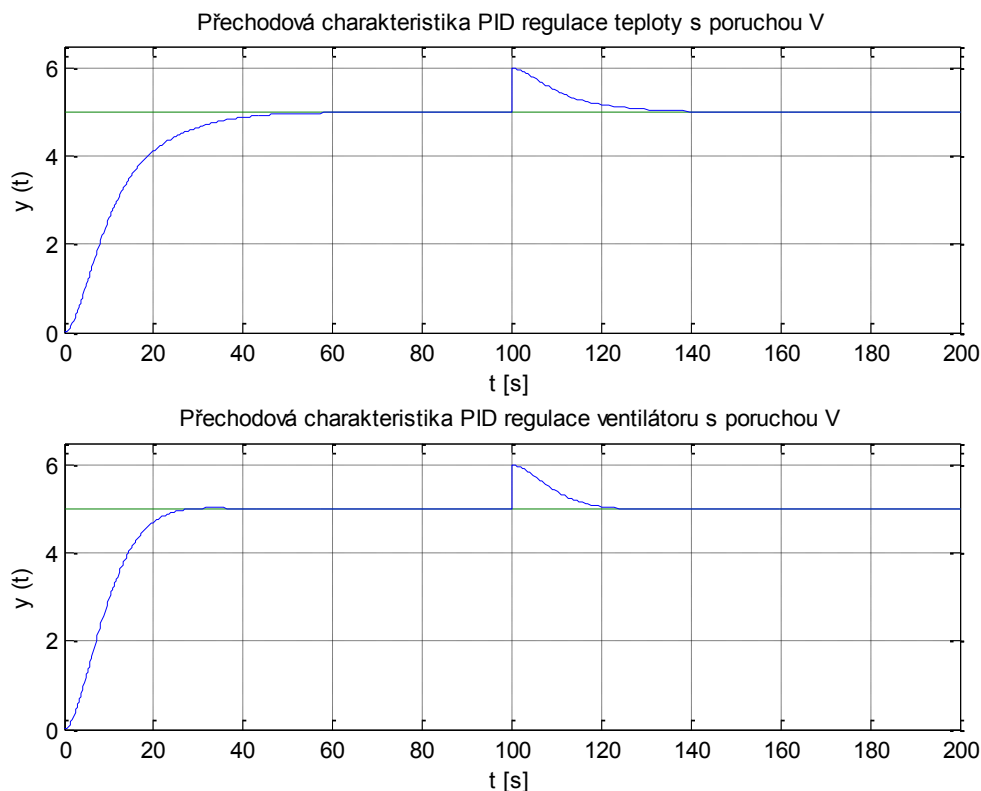
Po zajištění autonomnosti mnohorozměrného regulačního obvodu se stává přenosová matice otevřeného regulačního obvodu diagonální, proto dále postupujeme v návrhu regulátoru jako u 1. způsobu.

Hodnota matice korekčního členu v ustáleném stavu

$$\mathbf{G}_{K\check{c}}(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_{S12}}{G_{S11}} \\ -\frac{G_{S21}}{G_{S22}} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\left(\frac{-0,876}{0,72}\right) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1,217 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Invariantnost mnohorozměrného regulačního obvodu

Uvažujeme o poruchové veličině V , která působí na regulační obvod přes přenosovou matici G_p na výstupu regulované soustavy $G_p=1$. V průběhu simulace se zavedenou poruchou na výstupu regulované soustavy lze v grafu vidět, že vliv poruchy je v ustálené hodnotě odstraněn.



Obr. 25 - Přechodová charakteristika PID regulace s poruchou V

Vliv poruchy na regulovanou veličinu je částečně odstraněn pomocí regulátoru tzn., že regulační obvod je přibližně invariantní. Pokud bychom chtěli zajistit absolutní invariantnost musíme dopočítat korekční člen podle vzorce $G_{K\check{C}} = G_s^{-1}G_p$.

Ověření stability mnohorozměrného regulačního obvodu

Při návrhu mnohorozměrného regulátoru musíme kontrolovat stabilitu skutečného mnohorozměrného regulačního obvodu, bez zanedbání přenosu $G_{S12}(s)$. Přenosová matice otevřeného regulačního obvodu se vypočítá vynásobením přenosové matice soustavy s přenosovou maticí regulátoru

$$\begin{aligned}
\mathbf{G}_O(s) &= \mathbf{G}_S \cdot \mathbf{G}_R \\
&= \begin{bmatrix} \frac{k_1}{(T_1s+1)(T_2s+1)} & \frac{k_{12}}{(T_{12}s+1)(1+T_{d1}s)} \\ 0 & \frac{k_2}{(T_{22}s+1)(1+T_{d2}s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{p1} \left(1 + \frac{1}{T_{l1}s}\right) & 0 \\ 0 & k_{p2} \left(1 + \frac{1}{T_{l2}s}\right) \end{bmatrix}, \\
\mathbf{G}_O(s) &= \begin{bmatrix} \frac{T_{l1}s k_1 k_{p1} + k_1 k_{p1}}{T_{l1}s(T_1s+1)(T_2s+1)} & \frac{T_{l2}s k_{12} k_{p2} + k_{12} k_{p2}}{T_{l2}s(T_{12}s+1)(1+T_{d1}s)} \\ 0 & \frac{T_{l2}s k_2 k_{p2} + k_2 k_{p2}}{T_{l2}s(T_{22}s+1)(1+T_{d2}s)} \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

Charakteristický mnohočlen uzavřeného regulačního obvodu je důležitý pro vyšetření stability.

$$\begin{aligned}
\det(\mathbf{I} + \mathbf{G}_O) &= \frac{N(s)}{M(s)} \\
(\mathbf{I} + \mathbf{G}_O) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_{l1}s k_1 k_{p1} + k_1 k_{p1}}{T_{l1}s(T_1s+1)(T_2s+1)} & \frac{T_{l2}s k_{12} k_{p2} + k_{12} k_{p2}}{T_{l2}s(T_{12}s+1)(1+T_{d1}s)} \\ 0 & \frac{T_{l2}s k_2 k_{p2} + k_2 k_{p2}}{T_{l2}s(T_{22}s+1)(1+T_{d2}s)} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\det(\mathbf{I} + \mathbf{G}_O) &= \frac{T_{l1}s(T_1s+1)(T_2s+1) + T_{l1}s k_1 k_{p1} + k_1 k_{p1}}{T_{l1}s(T_1s+1)(T_2s+1)} \cdot \\
&\quad \frac{T_{l2}s(T_{22}s+1)(1+T_{d2}s) + T_{l2}s k_2 k_{p2} + k_2 k_{p2}}{T_{l2}s(T_{22}s+1)(1+T_{d2}s)}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N(s) &= [T_{l1}s(T_1s+1)(T_2s+1) + T_{l1}s k_1 k_{p1} + k_1 k_{p1}] \cdot [T_{l2}s(T_{22}s+1)(1+T_{d2}s) \\
&\quad + T_{l2}s k_2 k_{p2} + k_2 k_{p2}]
\end{aligned}$$

Po dosazení hodnot vypočítaných parametrů bude mít tvar

$$\begin{aligned}
N(s) &\doteq 167132,8s^6 + 149390s^5 + 45173,8s^4 + 13211,2s^3 + 1642,4s^2 + 104,8s \\
&\quad + 1,9.
\end{aligned}$$

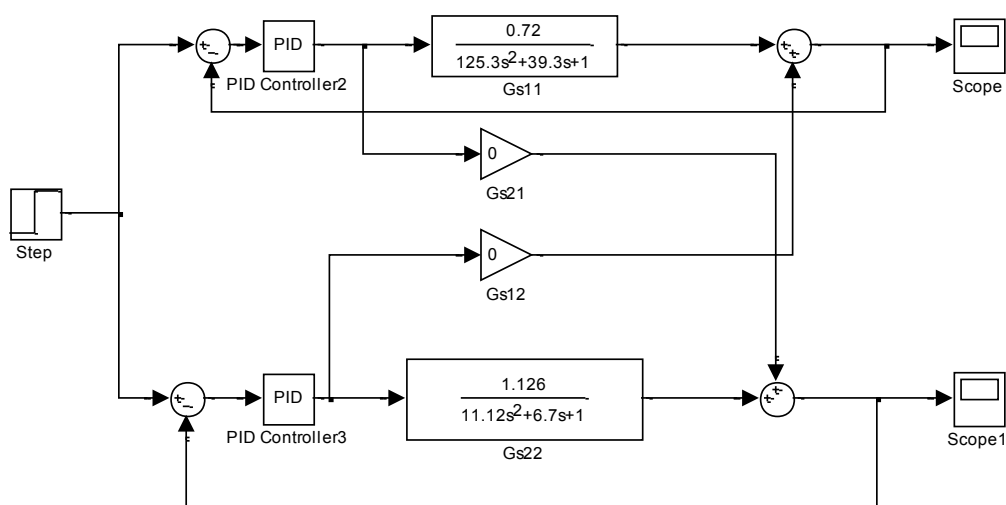
Předtím než budeme ověřovat stabilitu, musíme zkontrolovat **Stodolovu nutnou podmínku stability**, která zní „Všechny koeficienty charakteristické rovnice musí existovat a musí mít stejné znaménko“, tzn. $a_i > 0$; $i = 0, 1, \dots, n$. Jelikož je charakteristický mnohočlen řádu $n \leq 2$, nutná Stodolova podmínka přechází v nutnou a postačující podmínku stability. Stabilita regulačního obvodu je ověřována pomocí Routh-Schurova kritéria.

167132,8	<u>149390</u>	45173,8	<u>13211,2</u>	1642,4	<u>104,8</u>	1,9	(1,118768)
167132,8		14780,3		117,3			
0	149390	<u>30393,5</u>	13211,2	<u>1525,1</u>	104,8	<u>1,9</u>	(4,91519)
	149390		7496,2		9,3		
	0	30393,5	<u>5715</u>	1525,1	<u>95,5</u>	1,9	(5,318197)
		30393,5		507,9			
		0	5715	<u>1017,2</u>	95,5	<u>1,9</u>	(5,61836)
			5715		10,7		
			0	1017,2	84,4	1,9	

Při výpočtu jsme došli ke stavu, kdy nám zbývají tři kladné koeficienty, což znamená, že charakteristická rovnice má všechny kořeny ve stabilní oblasti. Mnohorozměrný regulační obvod je proto stabilní.

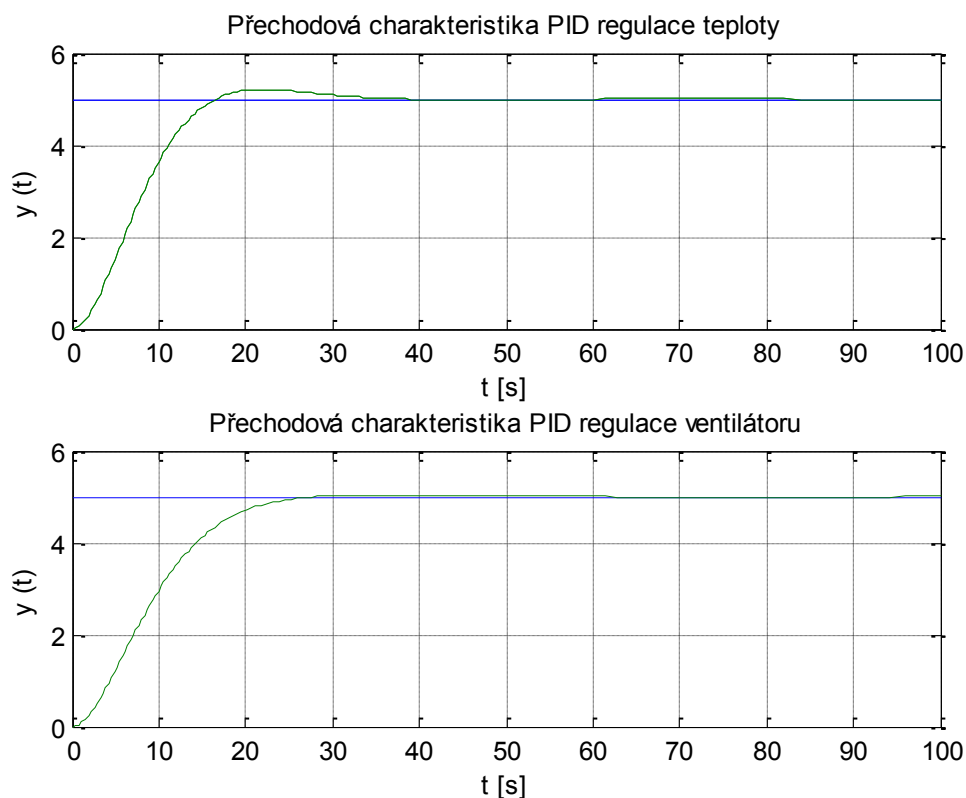
Verifikace navrženého regulátoru pomocí číslicové simulace

Simulace teplo-vzdušného modelu byla sestavena pomocí funkčních bloků v programu MATLAB Simulink. První model je podle 1. způsobu návrhu regulátoru, kdy jsme zanedbali přenos G_{S12} .



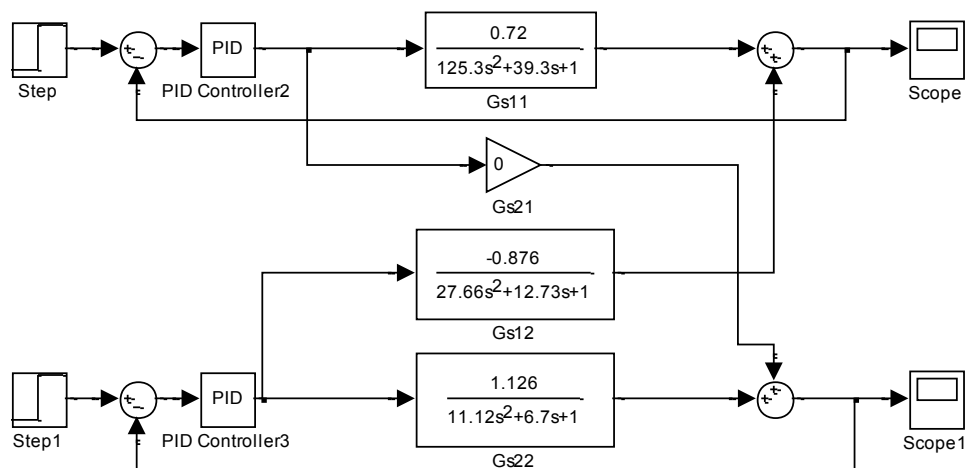
Obr. 26 - "P" struktura teplo-vzdušného modelu se zanedbaným přenosem G_{S12}

Při zanedbání přenosu G_{S12} se "P" struktura od „V“ struktury liší pouze modelem, výsledky regulace a průběhy přechodových charakteristik jsou stejné, proto model „V“ struktury zde není uveden. V průběhu regulace teploty (Obr. 27) lze vidět překmit, což je způsobeno zanedbáním přenosu, který ovlivňuje výsledný přenos teploty.

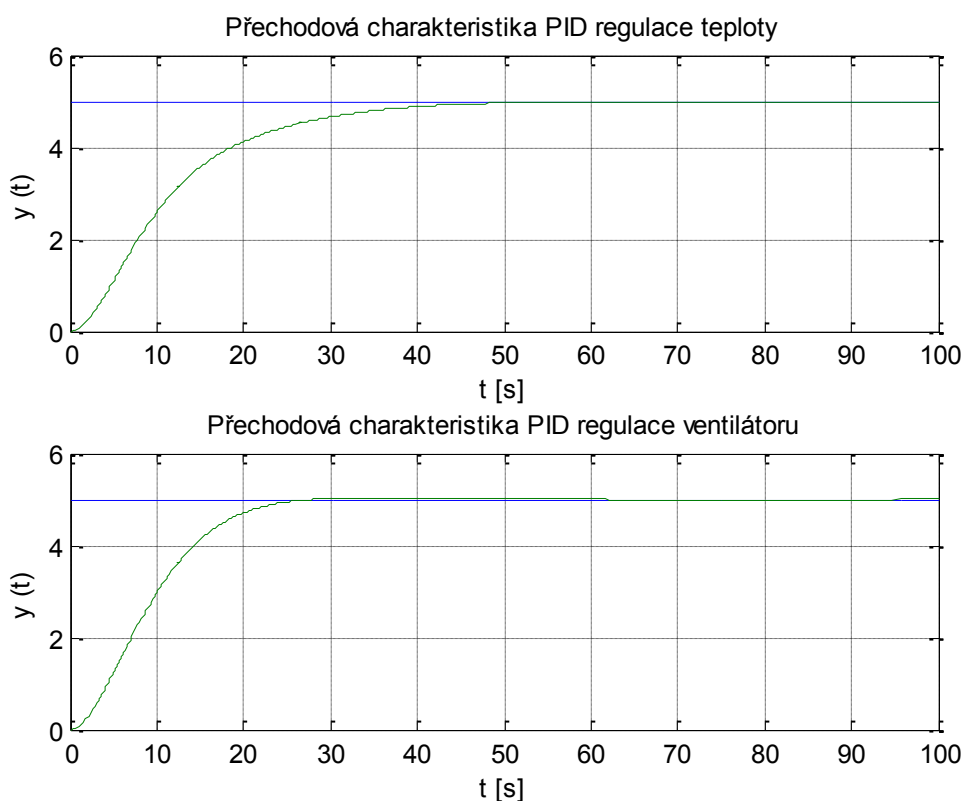


Obr. 27 - Přechodové charakteristiky modelu se zanedbáním přenosu G_{S12}

Jako další model budeme ověřovat návrh regulátoru na upravené soustavě s aproximovaným dopravním zpožděním.



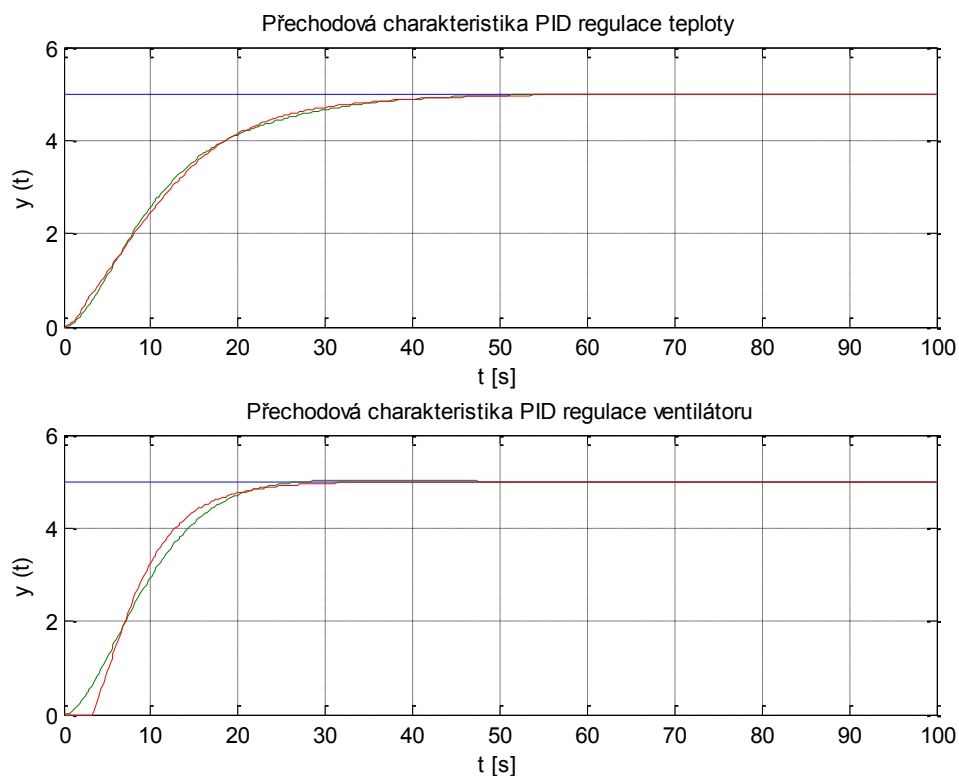
Obr. 28 – "P" struktura teplo-vzdušného modelu s navrženými regulátory



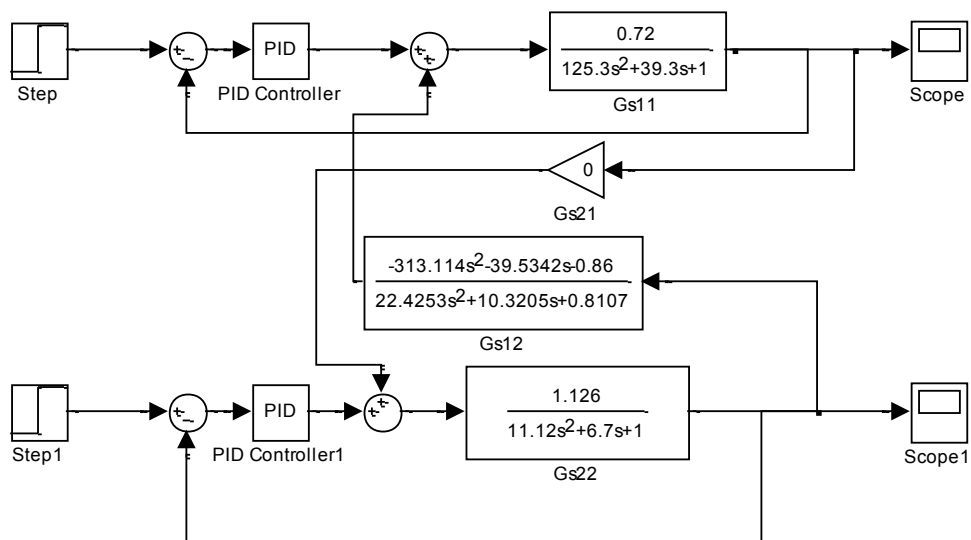
Obr. 29 - Přechodové charakteristiky PID regulace "P" struktury

Navržený regulátor splňuje kvalitu regulace, přechodová charakteristika PID regulace teploty a ventilátoru se ustálí na požadované hodnotě bez překmitu.

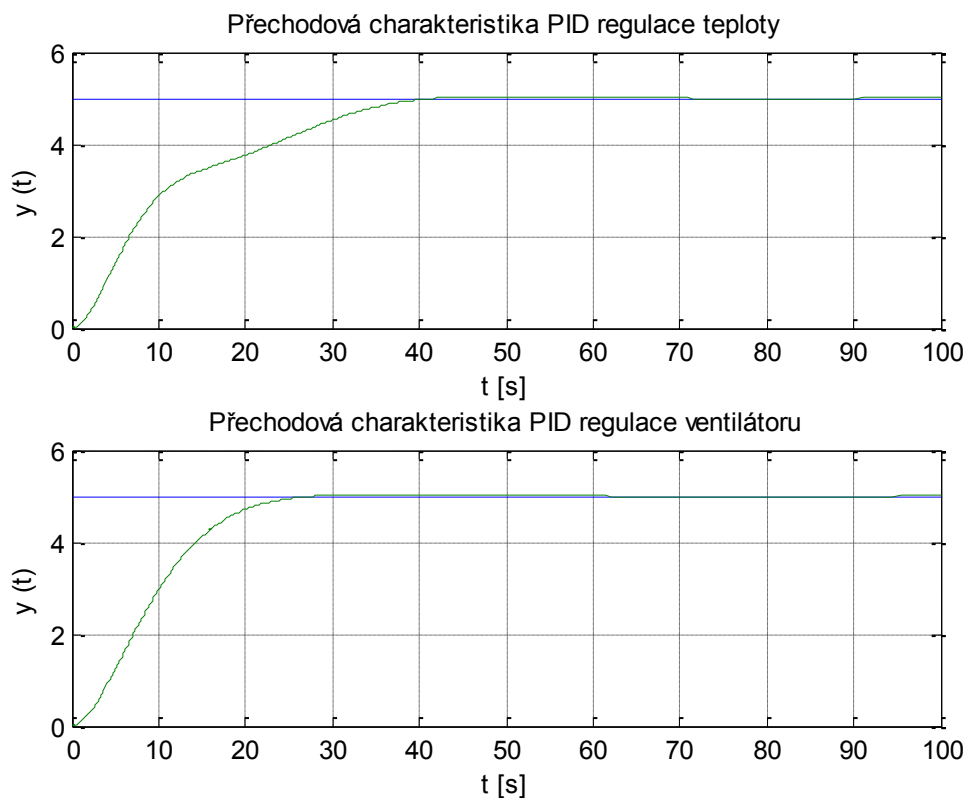
Na Obr. 30 lze v grafu vidět rozdíl mezi identifikovanou soustavou teplo-vzdušného modelu a soustavou s aproximovaným dopravním zpožděním. V grafech lze vidět dva průběhy, kdy zelený průběh je soustava s aproximovaným dopravním zpožděním a červený průběh je identifikovaná soustava. Průběhy se nejvíce liší v přechodové charakteristice ventilátoru, kdy se projevuje dopravní zpoždění identifikované soustavy teplo-vzdušného modelu.



Obr. 30 - Přechodové charakteristiky PID regulace identifikovaného a upravovaného teplo-vzdušného modelu



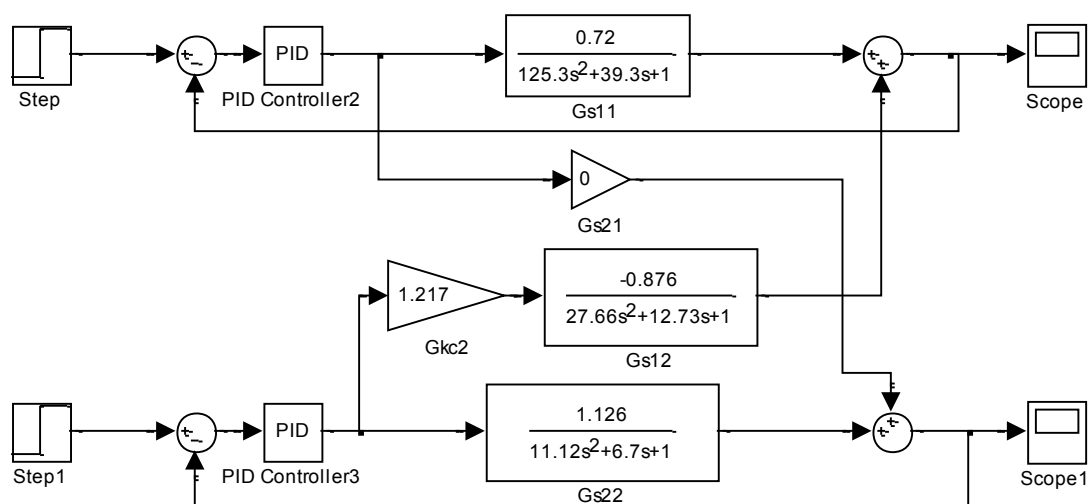
Obr. 31 - "V" struktura teplo-vzdušného modelu s navrženými regulátory



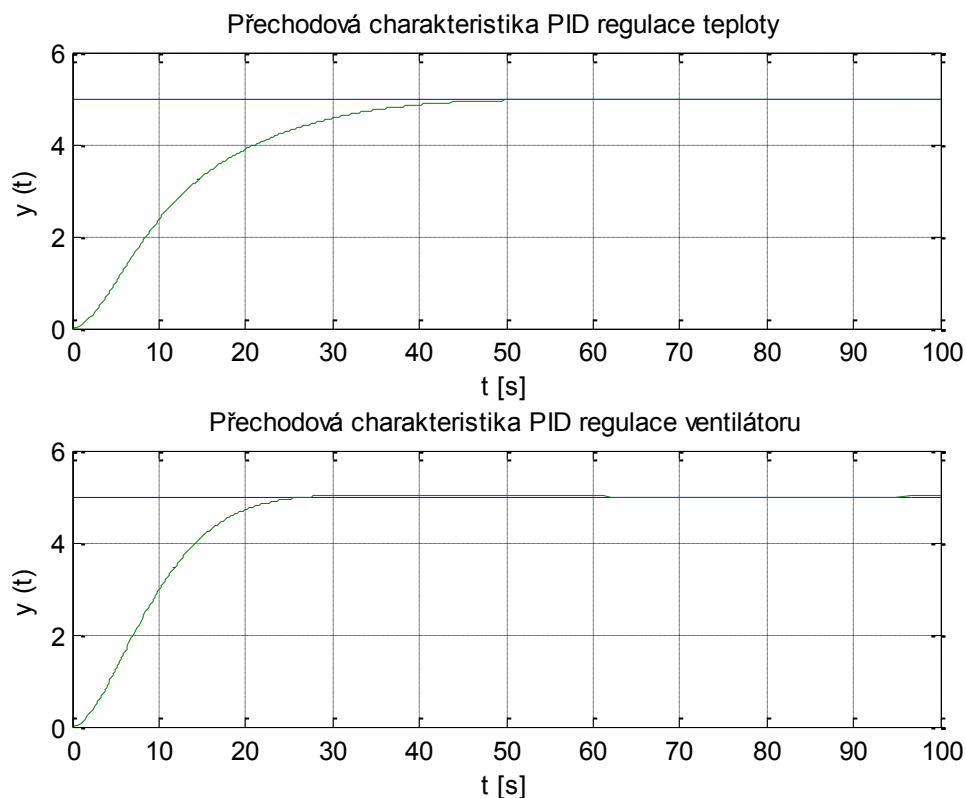
Obr. 32 - Přechodové charakteristiky PID regulace "V" struktury

Na Obr. 32 lze vidět přechodovou charakteristiku „V“ struktury teplo-vzdušného modelu a jeho navrženého regulátoru. Průběh přechodové charakteristiky PID regulace teploty „V“ struktury je ovlivněn úpravou přenosu.

Další modely struktur jsou podle 2. způsobu návrhu regulátoru, kdy zajišťujeme autonomnost pomocí korekčního členu. Korekční člen je v modelech vyjádřen jako hodnota v ustáleném stavu násobící přenos soustavy.

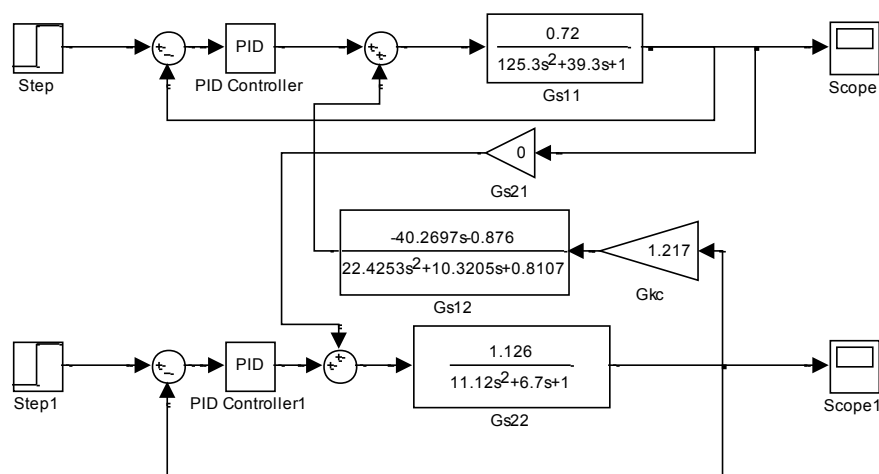


Obr. 33 - "P" struktura teplo-vzdušného modelu s korekčním členem

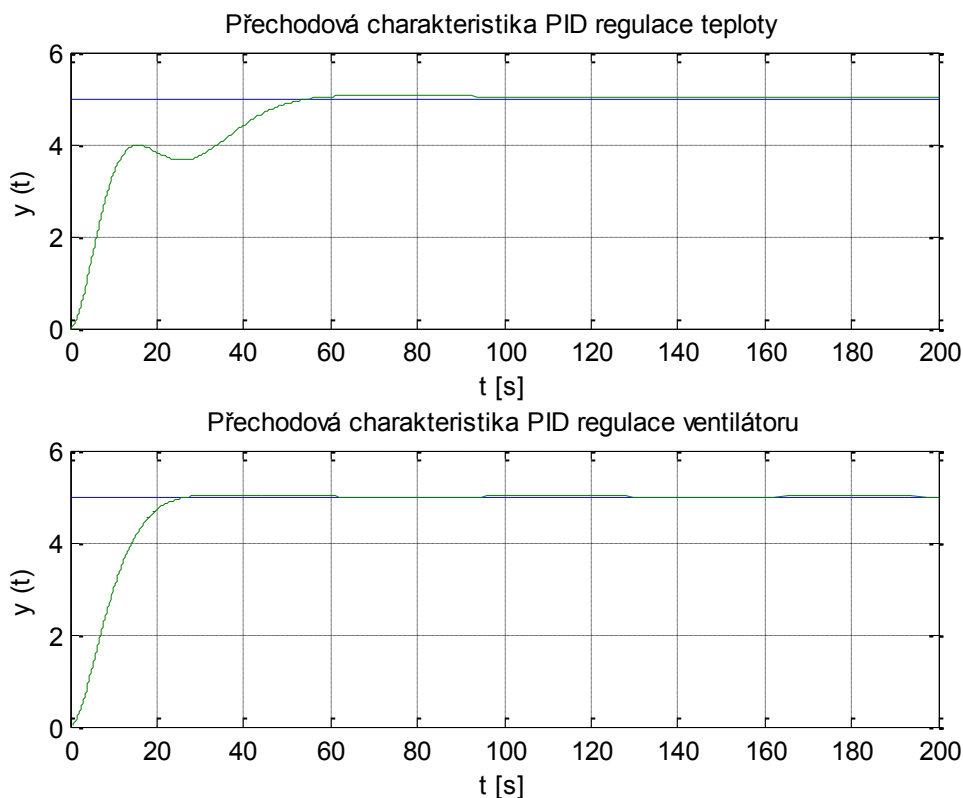


Obr. 34 - Přechodové charakteristiky PID regulace "P" struktury s korekčním členem

V grafech (Obr. 34) lze vidět přechodovou charakteristiku PID regulace teploty, která je ovlivňována přenosem G_{s12} a přechodovou charakteristiku PID regulace proudu vzduchu ventilátoru. Korekční člen násobící přenos G_{s12} lehce ovlivňuje dynamiku soustavy, tak že způsobuje pomalejší náběh na žádanou hodnotu.



Obr. 35 - "V" struktura teplo-vzdušného modelu s korekčním členem



Obr. 36 - Přechodové charakteristiky PID regulace "V" struktury s korekčním členem

Na Obr. 36 přechodové charakteristiky PID regulace „V“ struktury teplo-vzdušného modelu s korekčním členem lze vidět rozkmit teploty a malý překmit při ustalování na žádané hodnotě. Zhoršení průběhu je způsobeno korekčním členem násobícím soustavu a převodem z „P“ na „V“ strukturu.

Poslední model byl sestaven podle „P“ struktury dvourozměrných systémů. Kdy přenosy korekčního členu byly roznásobeny jednotlivými přenosy soustavy.

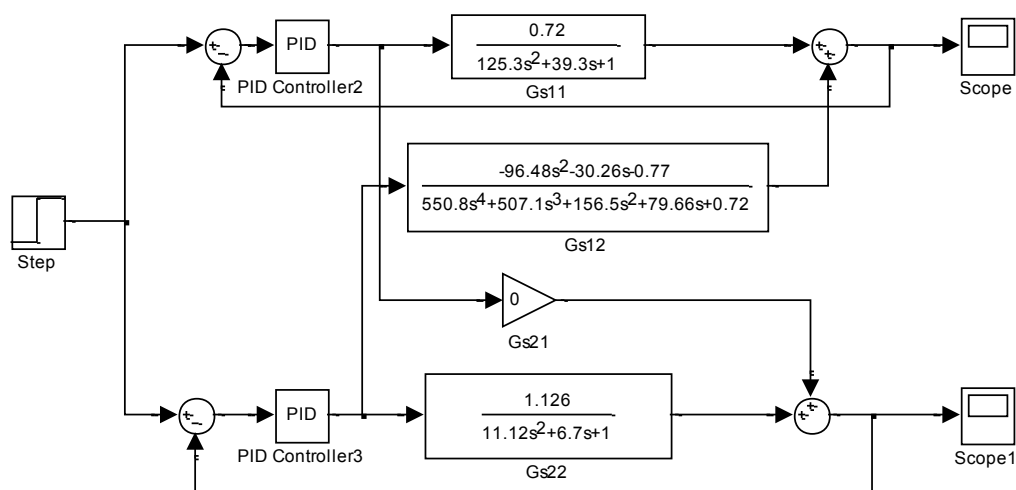
Výsledné rovnice vypadají takto

$$y_1 = G_{S11}G_{K\check{C}11}u_1 + G_{S12}G_{K\check{C}12}u_2 ,$$

$$y_2 = G_{S21}G_{K\check{C}21}u_1 + G_{S22}G_{K\check{C}22}u_2 ,$$

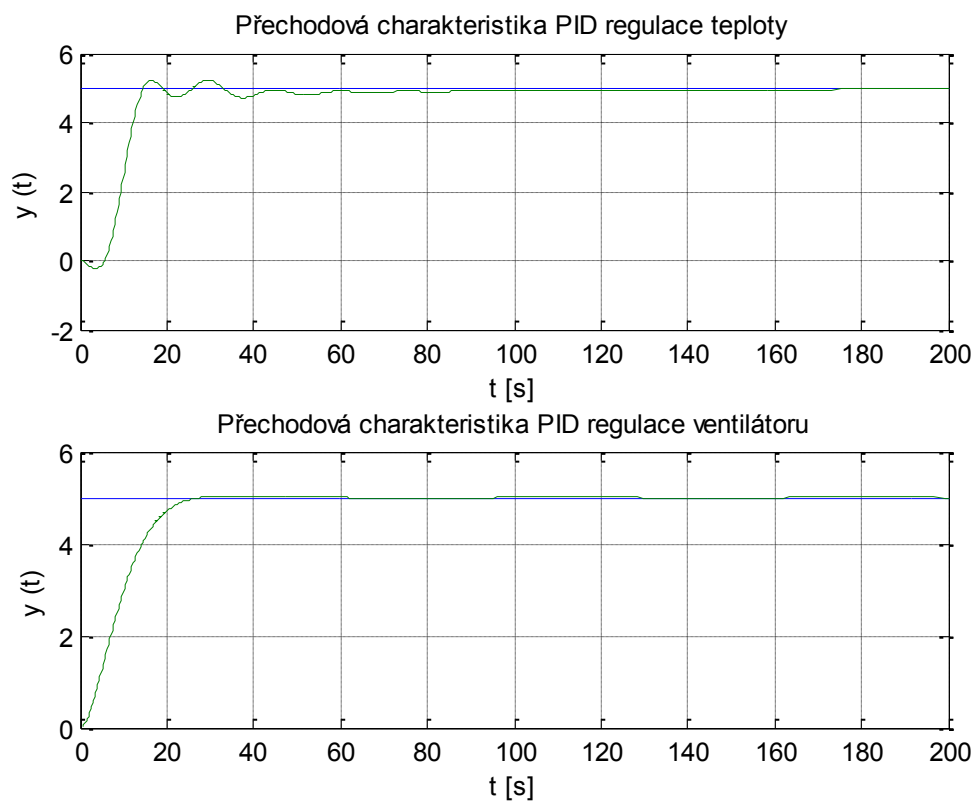
$$y_1 = \frac{k_1}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}u_1 - \frac{k_{12}^2(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{k_1(T_{12}s + 1)^2(T_{d1}s + 1)^2}u_2 ,$$

$$y_2 = \frac{k_2}{(T_2s + 1)(T_{d2}s + 1)}u_2 + 0 .$$



Obr. 37 - "P" struktura teplo-vzdušného modelu

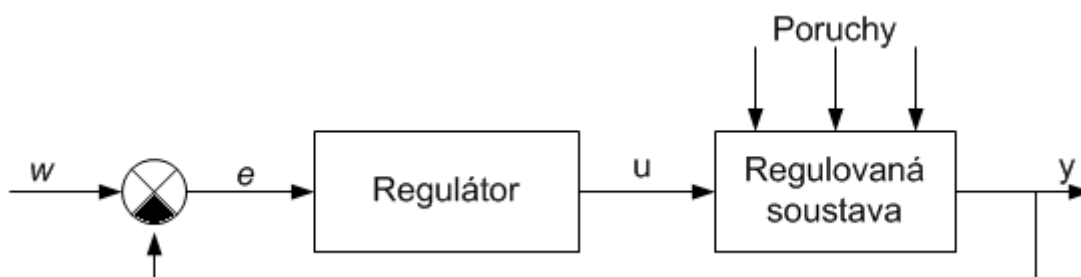
Výsledné přechodové charakteristiky (Obr. 38) se liší v závislosti teploty na termistoru a na napětí na žárovce. Zde se průběh ustálí na požadované hodnotě až po delším čase, což je způsobeno jeho kmitáním. Kmitavý průběh je způsoben novým přenosem, který vznikl roznásobením přenosu s korekčním členem. Zde lze vidět použití dynamiky korekčního členu při simulacích, v praxi se tento prvek nepoužívá.



Obr. 38 - Přechodové charakteristiky PID regulace "P" struktury

4 Návrh řízení pro laboratorní model

V této kapitole jsou popsány návrhy regulátorů pro laboratorní model. Regulátor je zařízení, které zajišťuje dosažení a udržení požadovaného stavu regulované soustavy. Používá se v záporné zpětné vazbě, a proto je jeho vstupem odchylka žádané hodnoty (e). Regulátor reguluje regulovanou soustavu, a to tak, že se snaží tuto odchylku eliminovat nebo ji udržet v předepsaných mezích. Návrh pro laboratorní model je zaměřen na jednorozměrné a mnohorozměrné regulátory.



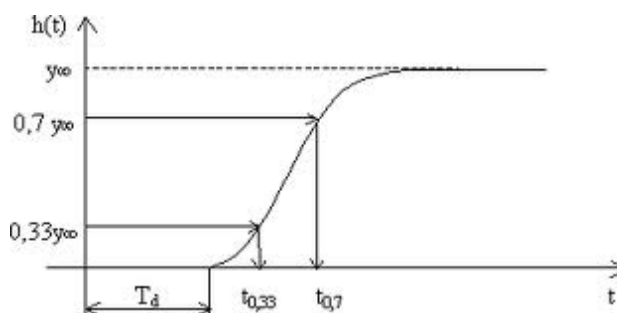
Obr. 39 - Obecné blokové schéma regulačního obvodu

4.1 Identifikace laboratorního modelu

Identifikace laboratorního modelu byla provedena aproximací naměřených přechodových charakteristik. Tato identifikace patří mezi deterministické metody, ze kterých byla vybrána aproximace dvoubodovou metodou. Z naměřených přechodových charakteristik lze vidět, že soustava má dopravní zpoždění. Aproximace dvoubodovou metodou určuje parametry pro obrazový přenos proporcionální soustavy prvního řádu s dopravním zpožděním

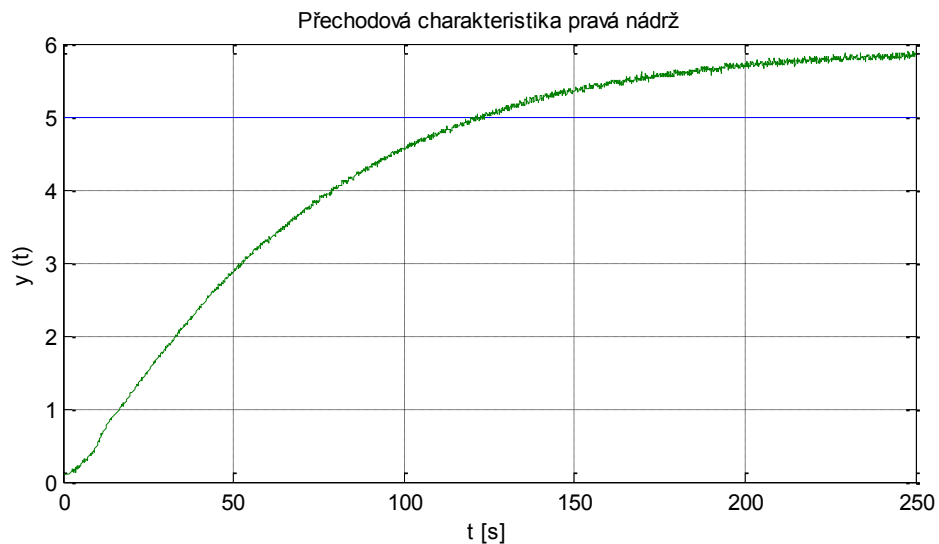
$$G_s(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)} e^{-T_d s}.$$

U aproximace dvoubodovou metodou je možné postupovat dvěma variantami, které se liší pouze ve výpočtu časových konstant přenosu.



Obr. 40 Aproximace přechodové charakteristiky dvoubodovou metodou-varianta č.1

Přechodové charakteristiky laboratorního modelu jsou měřeny pro dva případy ovlivňující průtok v horních nádržích. V prvním případě má laboratorní model vrchní vzdušník otevřený pro obě nádrže. Voda čerpaná do obou nádrží při přivedeném napětí na čerpadla 5V vytlačuje vzduch z nádrží do vzdušníku a pomalu protéká přes clonku do spodních nádrží. Otevření vzdušníku se projevilo v přechodových charakteristikách větším dopravním zpožděním a pomalejším náběhem soustavy.



Obr. 41 Přechodová charakteristika pravé nádrže při otevřeném vrchním vzdušníku

$$K = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = \frac{5,85}{5} = 1,17$$

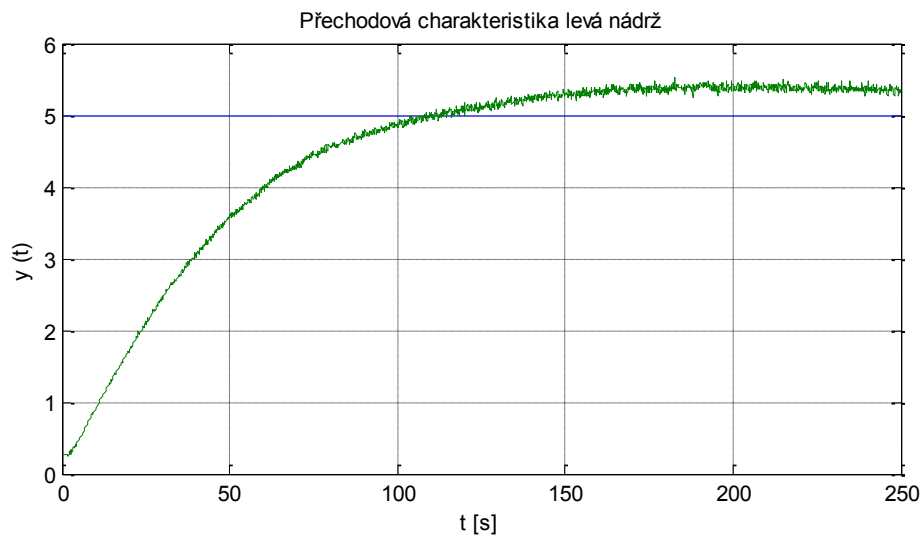
$$t_{0,7} = 81,9, t_{0,33} = 32,1$$

$$T_1 = 1,245(t_{0,7} - t_{0,33}) = 62$$

$$T_d = 1,498t_{0,33} - 0,498t_{0,7} = 7,3$$

Obrazový přenos pravé nádrže při otevřeném vzdušníku

$$G_s(s) = \frac{1,17}{(62s + 1)} e^{-7,3s}.$$



Obr. 42 Přechodová charakteristika levé nádrže při otevřeném vrchním vzdušníku

$$K = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = \frac{5,35}{5} = 1,07$$

$$t_{0,7} = 54,2, t_{0,33} = 20,8$$

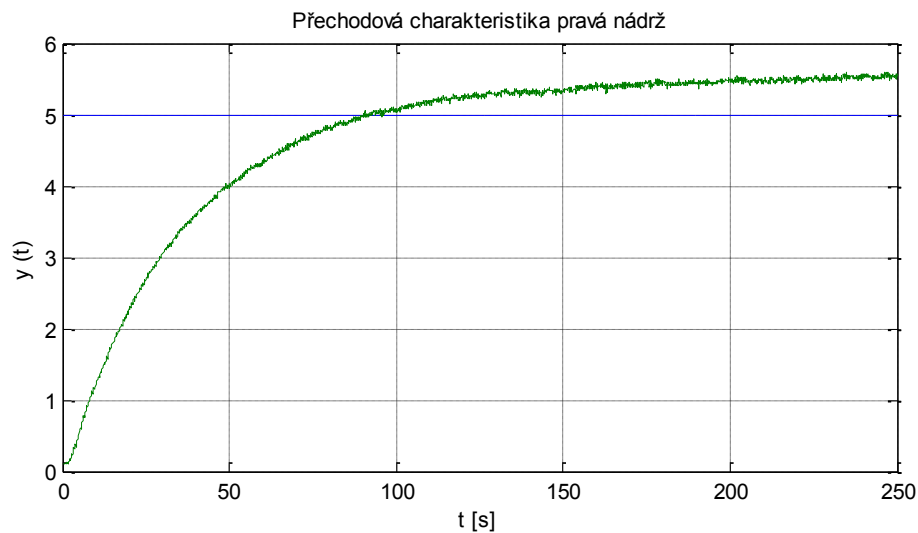
$$T_1 = 1,245(t_{0,7} - t_{0,33}) = 41,58$$

$$T_d = 1,498t_{0,33} - 0,498t_{0,7} = 4,17$$

Obrazový přenos levé nádrže při otevřeném vzdušníku

$$G_s(s) = \frac{1,07}{(41,58s + 1)} e^{-4,17s}.$$

V druhém případě byl u laboratorního modelu vrchní vzdušník uzavřen pro obě nádrže. V tomto případě je voda ihned vytlačována vzduchem z nádrží přes clonku do spodních nádrží. Zavření vzdušníku se projevilo v přechodových charakteristikách menším dopravním zpožděním a rychlejším náběhem soustavy.



Obr. 43 Přechodová charakteristika pravé nádrže při zavřeném vzdušníku

$$K = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = \frac{5,45}{5} = 1,09$$

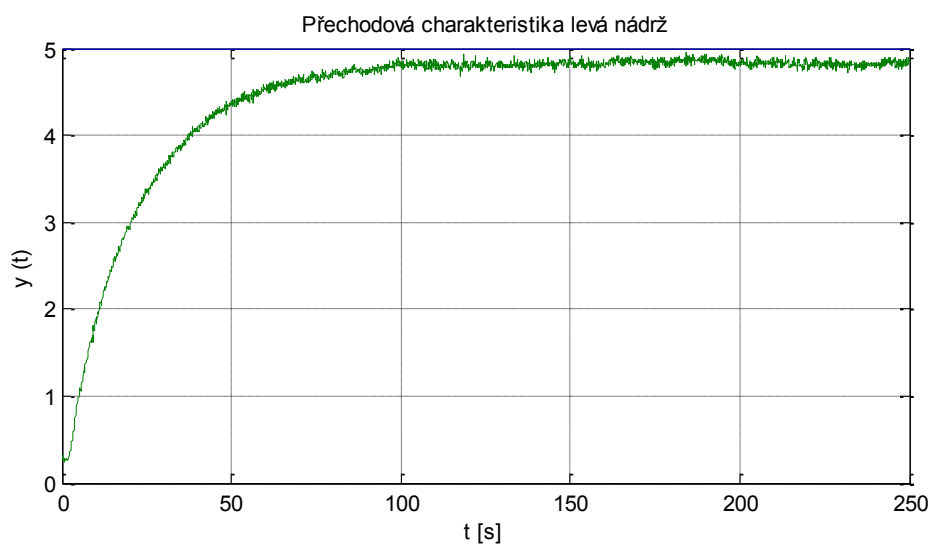
$$t_{0,7} = 44,6, t_{0,33} = 15,5$$

$$T_1 = 1,245(t_{0,7} - t_{0,33}) = 36,23$$

$$T_d = 1,498t_{0,33} - 0,498t_{0,7} = 1,01$$

Obrazový přenos pravé nádrže při zavřeném vzdušníku

$$G_s(s) = \frac{1,09}{(36,23s + 1)} e^{-1,01s}.$$



Obr. 44 Přechodová charakteristika levé nádrže při zavřeném vzdušníku

$$K = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = \frac{4,87}{5} = 0,974$$

$$t_{0,7} = 26, t_{0,33} = 8,8$$

$$T_1 = 1,245(t_{0,7} - t_{0,33}) = 21,41$$

$$T_d = 1,498t_{0,33} - 0,498t_{0,7} = 0,23$$

Obrazový přenos levé nádrže při zavřeném vzdušníku

$$G_s(s) = \frac{0,974}{(21,41s + 1)} e^{-0,23s}.$$

4.2 Návrh jednorozměrných regulátorů

Při návrhu jednorozměrných regulátorů pro laboratorní model použijeme tzv. syntézu regulačních obvodů. Syntéza regulačních obvodů je návrh struktury regulačního obvodu (regulátoru) tak, aby splňoval požadavky kladené na regulační pochod. Kvalita regulace je závislá na vhodně zvoleném typu regulátoru a jeho seřazením pro danou soustavu. U regulačních obvodů s dopravním zpožděním bývají veliké trvalé regulační odchylky, proto se používají regulátory obsahující více složek, které zajišťují kvalitu regulace.

Pro návrh regulátorů použijeme metodu požadovaného modelu (MPM). Tato metoda je vhodná pro soustavy s dopravním zpožděním.

Metoda požadovaného modelu (MPM)

Metoda požadovaného modelu (dříve též nazývaná metoda inverzní dynamiky) je analyticko-experimentální metoda seřizování konvenčních regulátorů, která vychází z požadovaného modelu uzavřeného regulačního obvodu, tj. z požadovaného přenos řízení ve tvaru

$$G_{wy}(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{a}{s + ae^{-T_d s}} e^{-T_d s},$$

kde a je zesílení otevřeného regulačního obvodu.

Je to metoda velmi jednoduchá, která využívá kompenzaci časových konstant, zajišťuje stupeň astatismu regulačního obvodu $q=1$ (tj. nulové trvalé regulační odchylky způsobené skokovými změnami polohy žádané veličiny w a poruchové veličiny v působící na výstupu regulované soustavy) a odpovídající volbou zesílení otevřeného regulačního obvodu a umožňuje dosáhnout požadovaného relativního překmitu κ v rozmezí od 0 do 0,5 (50%).

Tab. 2-Hodnoty stavitelných parametrů regulátoru pro metodu požadovaného modelu

Regulovaná soustava	Regulátor analogový $T=0$; číslicový $T>0$			
	TYP	k_p^*	T_I^*	T_D^*
$\frac{k_1}{T_1s + 1} e^{-T_d s}$	PI	$\frac{T_I^*}{(\alpha T + \beta T_d)k_1}$	$T_I - \frac{T}{2}$	-

Tab. 3 - Závislost koeficientů α a β na relativním překmitu κ

κ	0
α	1,282
β	2,718

[VÍTEČEK, A., VÍTEČKOVÁ, M. 2008]

Regulovaná soustava pravé nádrže

$$G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1s + 1)} e^{-T_d s}.$$

Výpočet regulátoru PI pro pravou nádrž se zavřeným vzdušníkem

$$T_I^* = T_1 - \frac{T}{2} = 36,23 - \frac{0}{2} = 36,23 \text{ [s]},$$

$$k_p^* = \frac{T_I^*}{(\alpha T + \beta T_d)k_1} = \frac{36,23}{(1,282 \cdot 0 + 2,718 \cdot 1,01)1,09} = 12,11.$$

Výpočet regulátoru PI pro pravou nádrž s otevřeným vzdušníkem

$$T_I^* = T_1 - \frac{T}{2} = 62 - \frac{0}{2} = 62 \text{ [s]},$$

$$k_p^* = \frac{T_I^*}{(\alpha T + \beta T_d)k_1} = \frac{62}{(1,282 \cdot 0 + 2,718 \cdot 7,29)1,17} = 2,67.$$

Regulovaná soustava levé nádrže

$$G_s(s) = \frac{k_2}{(T_2s + 1)} e^{-T_d s}.$$

Výpočet regulátoru PI pro levou nádrž se zavřeným vzdušníkem

$$T_I^* = T_1 - \frac{T}{2} = 21,41 - \frac{0}{2} = 21,41 \text{ [s]},$$

$$k_p^* = \frac{T_I^*}{(\alpha T + \beta T_d)k_1} = \frac{21,41}{(1,282 \cdot 0 + 2,718 \cdot 0,23)0,974} = 39,64.$$

Výpočet regulátoru PI pro levou nádrž s otevřeným vzdušníkem

$$T_I^* = T_1 - \frac{T}{2} = 41,58 - \frac{0}{2} = 41,58 \text{ [s]},$$

$$k_p^* = \frac{T_I^*}{(\alpha T + \beta T_d)k_1} = \frac{41,58}{(1,282 \cdot 0 + 2,718 \cdot 4,17)1,07} = 3,43.$$

4.3 Návrh mnohorozměrného regulátoru

Návrh mnohorozměrného regulátoru bude vypočítán pro laboratorní model. Přenosová matice soustavy vypadá takto

$$\mathbf{G}_S(s) = \begin{bmatrix} G_{S11} & G_{S12} \\ G_{S21} & G_{S22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{(T_1s + 1)} e^{-T_{d1}s} & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{T_2s + 1} e^{-T_{d2}s} \end{bmatrix}.$$

Vzhledem k diagonální přenosové matici soustavy, můžeme mnohorozměrný systém rozdělit na dva jednoduché systémy. Při návrhu jednorozměrných regulátorů pro tento laboratorní model byly navrženy PI regulátory metodou MPM v kapitole 4.2. Pro návrh mnohorozměrného regulátoru budou použity právě tyto regulátory a hodnoty parametrů, proto přenosová matice regulátoru bude vypadat

$$\mathbf{G}_R(s) = \begin{bmatrix} k_{p1}(1 + \frac{1}{T_{I1}s}) & 0 \\ 0 & k_{p2}(1 + \frac{1}{T_{I2}s}) \end{bmatrix}.$$

Vypočítané hodnoty parametrů regulátoru

$$\begin{aligned} T_{I1}^* &= T_1 - \frac{T}{2} = 36,23 - \frac{0}{2} = 36,23, \\ k_{p1}^* &= \frac{T_I^*}{(\alpha T + \beta T_d)k_1} = \frac{36,23}{(1,282 \cdot 0 + 2,718 \cdot 1,01)1,09} = 12,11, \\ T_{I2}^* &= T_1 - \frac{T}{2} = 21,41 - \frac{0}{2} = 21,41, \\ k_{p2}^* &= \frac{T_I^*}{(\alpha T + \beta T_d)k_1} = \frac{21,41}{(1,282 \cdot 0 + 2,718 \cdot 0,23)0,974} = 39,64. \end{aligned}$$

Ověření stability mnohorozměrného regulačního obvodu

Stabilitu bude ověřena podle Routh-Schurova kritéria. Jelikož přenosová matice soustavy obsahuje dopravní zpoždění, musíme zavést aproximaci

$$e^x = 1 + x.$$

Přenosová matice soustavy vypadá po úpravě

$$\mathbf{G}_S = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{(T_1s + 1)(1 + T_{d1}s)} & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{(T_2s + 1)(1 + T_{d2}s)} \end{bmatrix}.$$

Po zavedené substituci můžeme spočítat přenosovou matici otevřeného regulačního obvodu

$$\begin{aligned}
\mathbf{G}_O(s) &= \mathbf{G}_S \cdot \mathbf{G}_R \\
&= \begin{bmatrix} \frac{k_1}{(T_1s + 1)(1 + T_{d1}s)} & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{(T_2s + 1)(1 + T_{d2}s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{p1}(1 + \frac{1}{T_{I1}s}) & 0 \\ 0 & k_{p2}(1 + \frac{1}{T_{I2}s}) \end{bmatrix}, \\
\mathbf{G}_O(s) &= \begin{bmatrix} \frac{T_{I1}sk_1k_{p1} + k_1k_{p1}}{T_{I1}s(T_1s + 1)(1 + T_{d1}s)} & 0 \\ 0 & \frac{T_{I2}sk_2k_{p2} + k_2k_{p2}}{T_{I2}s(T_2s + 1)(1 + T_{d2}s)} \end{bmatrix}, \\
(\mathbf{I} + \mathbf{G}_O) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_{I1}sk_1k_{p1} + k_1k_{p1}}{T_{I1}(T_1s + 1)(1 + T_{d1}s)} & 0 \\ 0 & \frac{T_{I2}sk_2k_{p2} + k_2k_{p2}}{T_{I2}(T_2s + 1)(1 + T_{d2}s)} \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \frac{T_{I1}(T_1s + 1)(1 + T_{d1}s) + T_{I1}sk_1k_{p1} + k_1k_{p1}}{T_{I1}(T_1s + 1)(1 + T_{d1}s)} & 0 \\ 0 & \frac{T_{I2}(T_2s + 1)(1 + T_{d2}s) + T_{I2}sk_2k_{p2} + k_2k_{p2}}{T_{I2}(T_2s + 1)(1 + T_{d2}s)} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Výpočet determinantu ze součtu jednotkové matice a přenosové matice otevřeného regulačního obvodu

$$\begin{aligned}
\det(\mathbf{I} + \mathbf{G}_O) &= \frac{T_{I1}s(T_1s + 1)(1 + T_{d1}s) + T_{I1}sk_1k_{p1} + k_1k_{p1}}{T_{I1}s(T_1s + 1)(1 + T_{d1}s)} \cdot \\
&\quad \frac{T_{I2}s(T_2s + 1)(1 + T_{d2}s) + T_{I2}sk_2k_{p2} + k_2k_{p2}}{T_{I2}s(T_2s + 1)(1 + T_{d2}s)}.
\end{aligned}$$

Vypočítaný charakteristický mnohočlen $N(s)$ před dosazením hodnot jednotlivých parametrů

$$\begin{aligned}
N(s) &= [T_{I1}s(T_1s + 1)(1 + T_{d1}s) + T_{I1}sk_1k_{p1} \\
&\quad + k_1k_{p1}] \cdot [T_{I2}s(T_2s + 1)(1 + T_{d2}s) + T_{I2}sk_2k_{p2} + k_2k_{p2}].
\end{aligned}$$

Hodnoty jednotlivých parametrů

$$T_1 = 36,23; T_2 = 21,41; T_{d1} = 1,01; T_{d2} = 0,23; k_1 = 1,09; k_2 = 0,974$$

Charakteristický mnohočlen po dosazení hodnot jednotlivých parametrů

$$\begin{aligned}
N(s) &\doteq 139772s^6 + 756477s^5 + 1661793s^4 + 1284151s^3 + 418854s^2 + 27074s \\
&\quad + 444.
\end{aligned}$$

Stodolova nutná postačující podmínka je splněna, jelikož jsou všechny koeficienty charakteristického mnohočlenu kladné, poté můžeme pokračovat ve výpočtu podle daného kritéria.

Výpočet stability pomocí Routhova-Schurova kritéria.

139772	<u>756477</u>	1661793	<u>1284151</u>	418854	<u>27074</u>	444	(0,184767)
139772		237268		5002			
0	756477	<u>1424525</u>	1284151	<u>413852</u>	27074	<u>444</u>	(0,531038)
	756477		219771		236		
	0	1424525	<u>1064380</u>	413852	<u>26838</u>	444	(1,3383613)
		1424525		35919			
		0	1064380	<u>377933</u>	2638	<u>444</u>	(2,816319)
			1064380		1250		
			0	377933	1388	444	

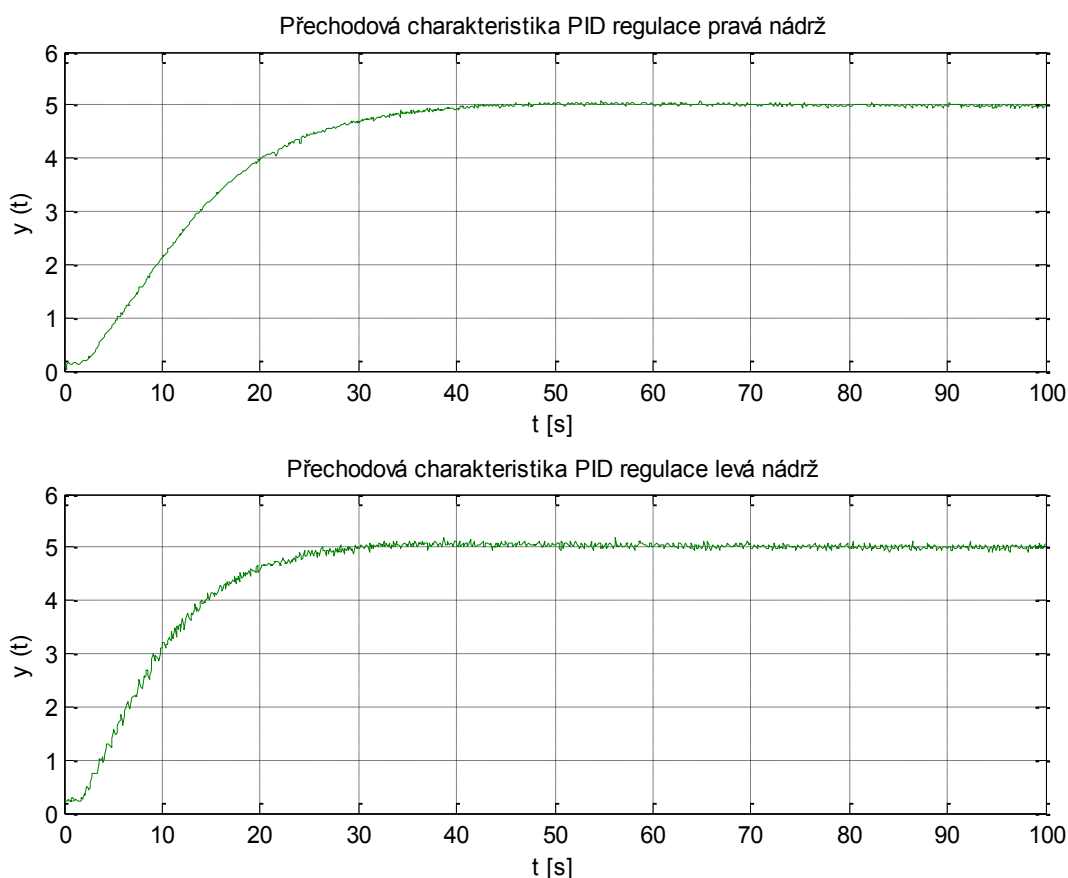
Při výpočtu jsme došli ke stavu, kdy nám zbývají tři kladné koeficienty, což znamená, že charakteristická rovnice má všechny kořeny ve stabilní oblasti. Mnohorozměrný regulační obvod je proto stabilní.

4.4 Ověření návrhu regulátoru na laboratorním modelu

Ověření návrhu regulátoru na laboratorním modelu bylo při zavřených vzdušnicích, jelikož při otevřených vzdušnicích měly tendenci vrchní nádrže přetékat. Navržený jednorozměrný i mnohorozměrný regulátor podle metody MPM vykazoval velký překmit přechodové charakteristiky kolem 25% u obou nádrží. Takto velký překmit je pro regulaci výšky hladiny nepřijatelný, proto budeme dále postupovat experimentální metodou seřizování regulátorů. Tato metoda spočívá v zachování navržené integrační časové konstanty regulátoru T_I a snižování navrženého zesílení k_p .

Hodnoty parametrů regulátoru pro pravou a levou nádrž

$$T_{I1}^* = 36,23 \quad k_{p1}^* = 2,5 \quad ; \quad T_{I2}^* = 21,41 \quad k_{p2}^* = 2,5$$



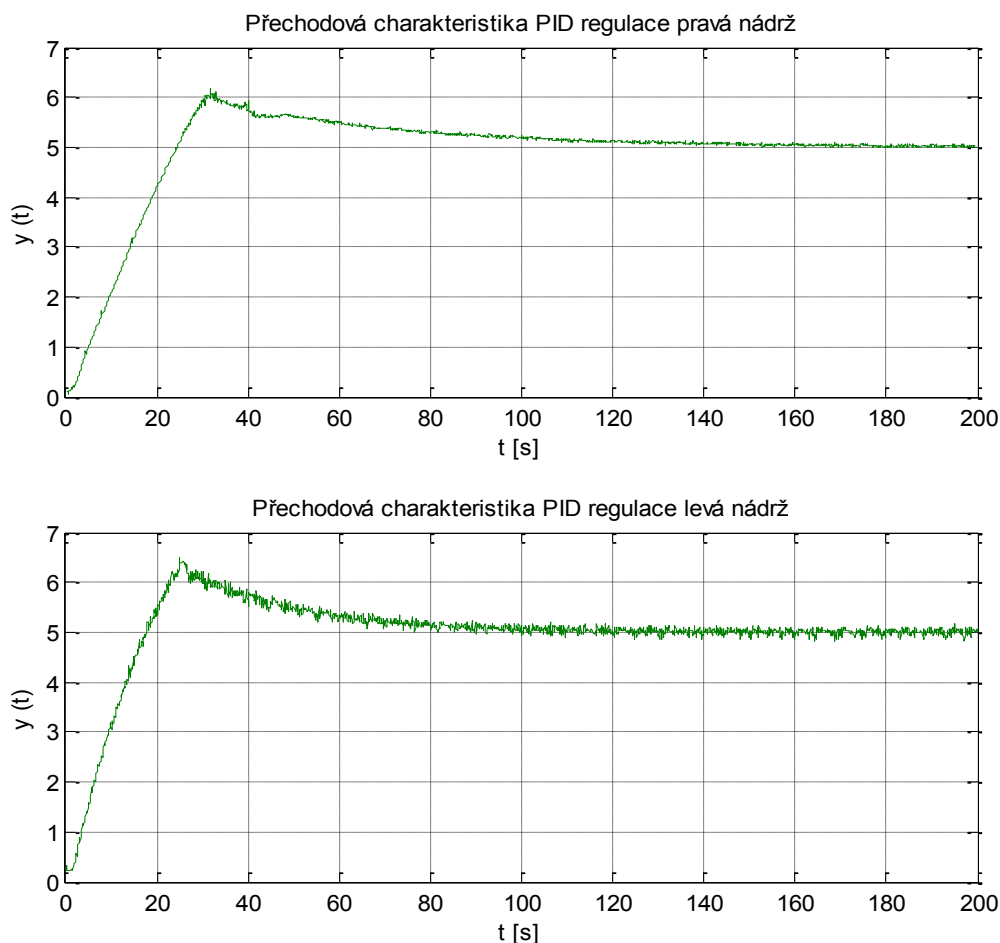
Obr. 45 PID regulace podle experimentální metody seřizování regulátorů

Regulace výšky hladiny se podařilo postupným snižováním zesílení regulátoru seřídít, tak že průběh je bez překmitů pro obě nádrže.

Návrh regulátoru PI pomocí metody požadovaného modelu nebyl z hlediska velikosti překmitu vhodný, proto byly použity i jiné metody návrhu regulátoru. Jednou z použitých metod byla „Univerzální“ experimentální metoda.

Hodnoty parametrů regulátoru pro pravou a levou nádrž

$$T_{I1}^* = 42,39 \quad k_{p1}^* = 11,52 \quad ; \quad T_{I2}^* = 25,05 \quad k_{p2}^* = 32,82$$



Obr. 46 PID regulace podle "Univerzální" experimentální metody

Výsledná regulace podle této metody je také nepřijatelná kvůli velkému překmitu, u levé nádrže je to 29%. Velké zesílení regulátoru ovlivňuje velikost překmitu.

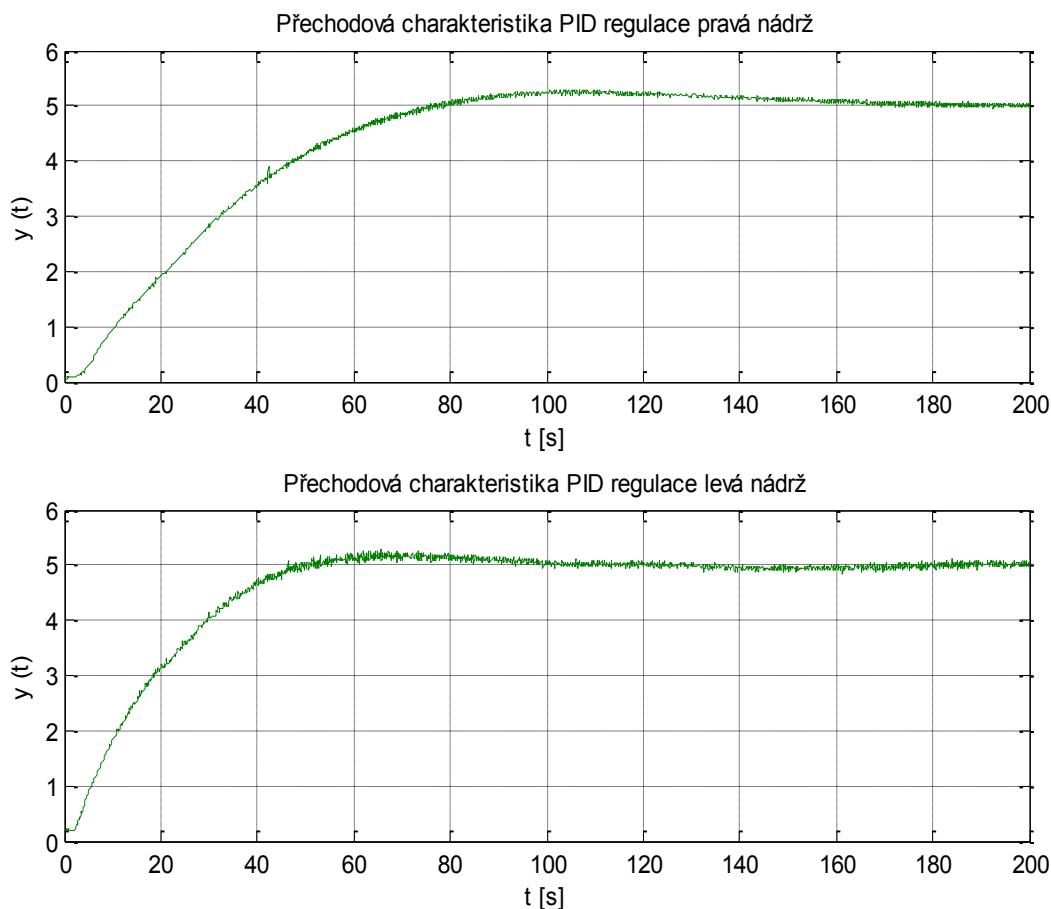
Další použitou metodou pro návrh regulátoru byla metoda optimálního modulu. Metoda optimálního modulu předpokládá pro použití PI regulátoru regulovanou soustavu se setrvačností 2. řádu s rozdílnými časovými konstantami. Přenos regulované soustavy byl znovu identifikován podle Strejcovy metody, kdy jsme zanedbali malé dopravní zpoždění, které nám vyšlo u předchozí identifikace soustavy s uzavřenými vzdušníky.

Identifikované přenosy pravé a levé nádrže

$$G_{sR}(s) = \frac{1,09}{(24,86s + 1)(13,82s + 1)} \quad , \quad G_{sL}(s) = \frac{0,974}{(14,88s + 1)(8,28s + 1)} \quad .$$

Hodnoty parametru navrženého PI regulátoru pro pravou a levou nádrž:

$$T_I^* = 24,86 \quad k_p^* = 0,83 \quad ; \quad T_I^* = 14,88 \quad k_{pP}^* = 0,92$$

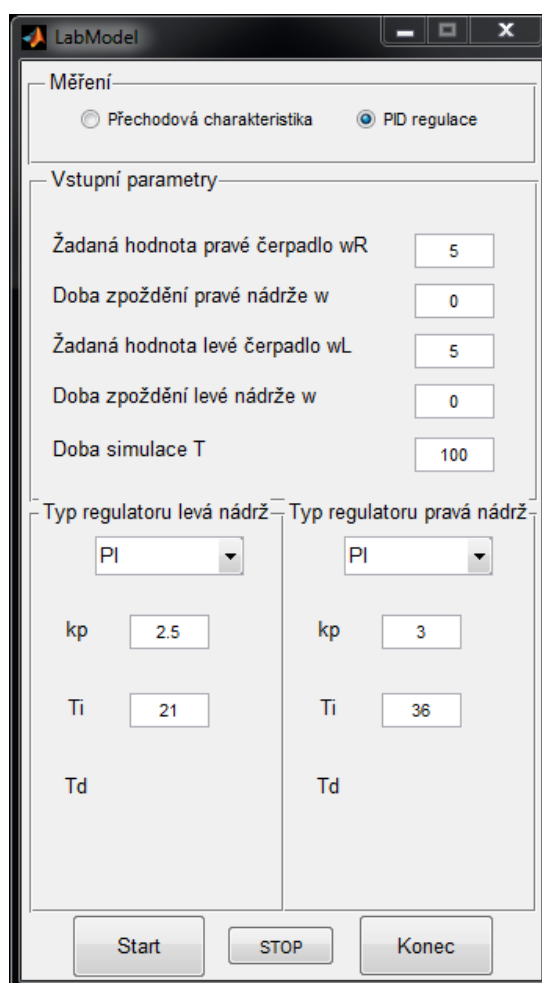


Obr. 47 PID regulace podle metody optimálního modulu

Regulace podle metody optimálního modulu je přijatelná pro regulaci výšky hladiny. Překmit přechodové charakteristiky není výrazně velký jako u předchozích metod. Velikost překmitu u pravé nádrže je 5,8% a u levé nádrže je 5,4%.

5 Uživatelská aplikace

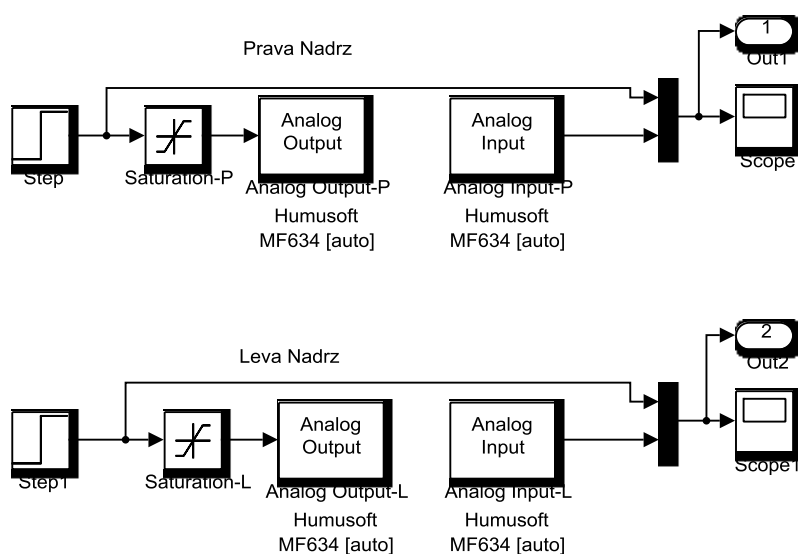
Uživatelská aplikace je vytvořena jako GUI aplikace programu MATLAB. GUI aplikace využívá pro program dva soubory, kdy v jednom souboru je uložen vzhled a v druhém zdrojový kód aplikace. Vlastnosti jednotlivých komponent definujeme ve zdrojovém souboru, který si program MATLAB vygeneruje po uložení navržené aplikace. V aplikaci jsou použity další soubory zajišťující běh aplikace s reálným modelem. Při spuštění aplikace se otevře ovládací panel, viz Obr. 48 pro měření na laboratorním modelu.



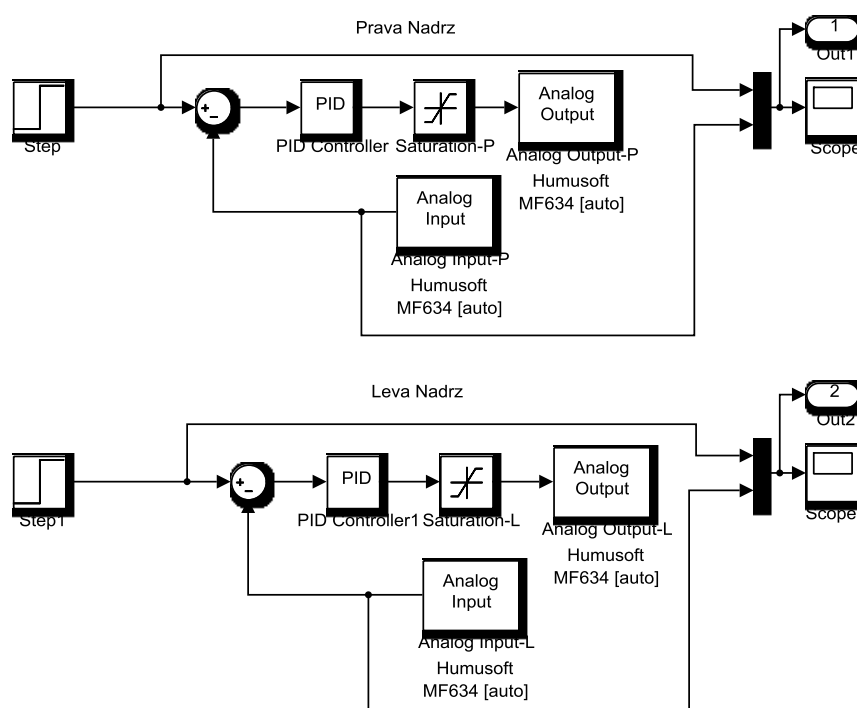
Obr. 48 Ovládací panel aplikace

Uživatel může zvolit ze dvou typů měření Přechodová charakteristika nebo PID regulace. Tyto dva typy měření se provádí pomocí funkčních m-souborů, které spouštějí měření na laboratorním modelu a starají se o vykreslení naměřených průběhů. Po vybrání typu měření uživatel zadá vstupní parametry do jednotlivých polí a stiskne tlačítko *START*. Funkce tlačítka *START* je definovaná v samostatném m-souboru, který je po stisku tlačítka spouštěn. Soubor *Start.m* nejdříve kontroluje podmínku vybrání měření

a poté načítá zadané hodnoty měření do workspace v programu MATLAB. U všech hodnot je podmínka kontrolující zadávání v číselných hodnotách a u žádané hodnoty je přidána kontrola maximální zadávané hodnoty. Maximální hodnota byla nastavena kvůli zabezpečení přetečení nádrží laboratorního modelu. Při měření PID regulace je kromě kontroly zadávaných hodnot, nastavený i přepočet parametrů regulátoru. Po kontrole zadaných hodnot soubor odkazuje na spouštění daného funkčního souboru měření. Funkční soubory se od sebe výrazně neliší, v každém z nich načítáme požadované hodnoty a spouštíme simulační model propojený s laboratorním modelem k vykreslení požadovaných průběhů.

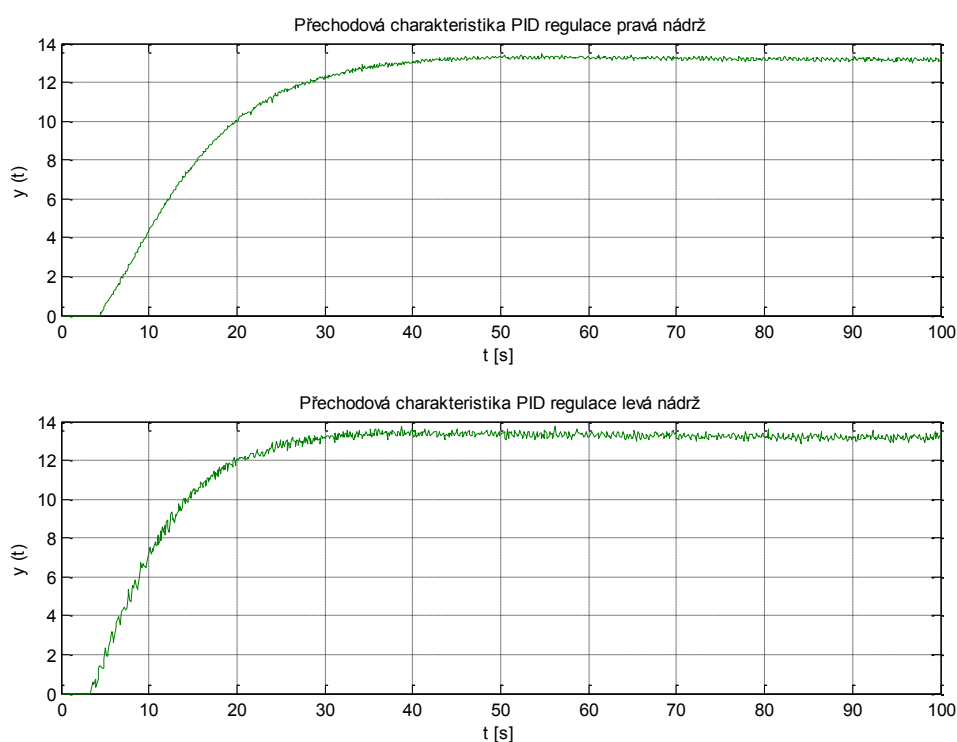


Obr. 49 Schéma simulačního modelu pro měření přechodové charakteristiky



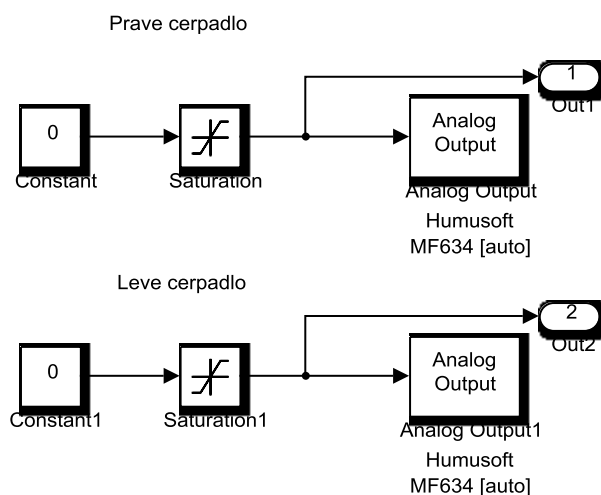
Obr. 50 Schéma simulačního modelu pro měření PID regulace

Ve funkčních souborech ukládáme jak zadané hodnoty, tak naměřené hodnoty do adresáře, pro případ kdyby uživatel chtěl s daty později pracovat. Funkční soubor obsahuje přepočít výšky hladiny z [V] na [cm], který byl určen lineární závislostí z naměřených hodnot. Tento přepočít je pro první hodnoty pohybující se okolo nuly záporný, proto byl u přepočtu zahrnut cyklus, který tyto hodnoty nuluje.



Obr. 51 Přechodová charakteristika PID regulace s výškou hladiny v [cm]

Každý funkční soubor končí svoji funkci spouštěním simulačního modelu *modelSTOP.mdl*, který zajišťuje zastavení měření přivedením nulového napětí na vstupy čerpadel.



Obr. 52 Schéma simulačního modelu určeného k zastavení měření

Tento model je využíván i v případě tlačítka *STOP* k okamžitému ukončení probíhajícího měření. Tlačítko po stisknutí podobně jako tlačítko *START* spouští m-soubor *Stop.m*. V souboru je definovaná podmínka rozlišující vybrané měření, podle kterého zastavuje probíhající měření na modelu. Po zastavení spuštěného simulačního modelu ihned zastavuje laboratorní model.

Závěr

Popsal jsem laboratorní model soustavy nádrží vyrobený na Katedře řízení procesů a výpočetní techniky Univerzity Pardubice. Laboratorní model se skládá ze dvou částí mechanické a elektrické, tyto části jsou podrobně popsány v kapitole 1. Laboratorní model je dvourozměrný systém se dvěma vstupy a dvěma výstupy, pro který navrhuji řízení. Seznámil jsem se s vlastnostmi mnohorozměrných soustav a návrhem regulátorů pro tyto soustavy. Mnohorozměrné soustavy jsou soustavy s více vstupními a více výstupními veličinami tzv. MIMO systémy. Mezi nejjednodušší mnohorozměrné systémy patří dvourozměrné systémy, které se vyznačují dvěma strukturami. Tyto struktury jsou ukázány a použity na řešeném modelu. Při návrhu regulátorů pro mnohorozměrnou soustavu můžeme postupovat dvěma způsoby, buď systém zjednodušíme, anebo zajistíme autonomnost pomocí korekčního členu. Pro návrh regulátorů používáme standardní metody pro návrh jednorozměrných regulátorů. Po návrhu regulátorů je vhodné spočítat stabilitu regulačního obvodu podle určitých podmínek a kritérií, které jsou v této práci uvedeny. Vybraný příklad pro návrh mnohorozměrného regulátoru byl použit teplo-vzdušný model. U tohoto příkladu jsem použil zmíněné způsoby návrhu regulátoru. Modely a výsledky simulací jsou uvedeny a zhodnoceny pro tento příklad dvourozměrného systému. Návrhy regulátorů pro daný laboratorní model byly vypočítány z přenosů regulované soustavy. Tyto přenosy byly získány pomocí dvoubodové metody identifikace přechodové charakteristiky. Návrhy regulátorů byly ověřeny a zhodnoceny pro každou metodu návrhu regulátorů.

Cílem této práce bylo vytvořit návrh aplikace v programu MATLAB/GUIDE. Vytvořená aplikace usnadňuje měření na laboratorním modelu. Skládá se ze dvou funkčních m-souborů určených pro daný typ měření a ze dvou m-souborů spouštějících se po stisku *START/STOP* tlačítka. Soubory grafického prostředí aplikace jsou dva, kdy jeden ukládá vzhled aplikace a druhý definuje jednotlivé vlastnosti objektů. Aplikace komunikuje s laboratorním modelem pomocí blokového prostředí Simulink, kde jsou bloky podporující komunikaci s měřicí kartou MF634. Aplikace umožňuje ukládání naměřených hodnot průběhů, se kterými může uživatel později pracovat. Aplikace je vytvořena pro studenty tak, aby ji mohli intuitivně ovládat bez znalosti prostředí MATLAB. V aplikaci jsou k dispozici dva typy experimentů, jeden je určen k identifikaci soustavy pomocí přechodové charakteristiky. Druhý typ experimentu je regulace výšky hladiny v jednotlivých nádržích.

Aplikaci je možné použít i pro řízení jiných laboratorních modelů, které mají dva vstupy a dva výstupy. K řízení laboratorního modelu jsou vytvořeny dva modely

v prostředí MATLAB/Simulink pro dané experimenty, které je možné upravit pro jiný laboratorní model. Přepočet výšky hladiny v [cm] by se zanedbal, nebo by se nahradil jiným přepočtem pro daný laboratorní model.

Směr dalšího řešení pro tuto aplikaci, by bylo rozšířit ji o další experiment prováděný na laboratorním modelu a o sledování průběhu během simulace.

Použitá literatura

BALÁTĚ, J. 2003. *Automatické řízení*. Praha Nakladatelství BEN, 2003, 654 s. ISBN 80-7300-020-2.

DORF, R. C., BISHOP, R. H. 1998 *Modern Control Systems*. Addison – Wesley Harlow England 1998. ISBN 0-201-30864-9.

DUŠEK, F. 2000. *Matlab a Simulink úvod do používání*, Pardubice, 2000, 146 s. ISBN 80-7194-273-1.

DUŠEK, F. 2006. *Hydraulicko-pneumatická soustava*, Pardubice, 2006, 17 s.

DUŠEK, F., HONC, D. 2004 *Hydraulicko-pneumatická soustava: Matematický model* [PDF dokument]. 20 s

DUŠEK, F., HONC, D. MACHÁČEK, J. 2005 *Výukový laboratorní model hydraulicko-pneumatické soustavy*. Automa 8-9, 2005, s. 108-109

DUŠEK, F., ŠKRABÁNEK, P., MAREŠ, J. *Experimentální identifikace stavového modelu*. Univerzita Pardubice, 20 s. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab08/prispevky/027_skrabaneck.pdf

KLÁN, P., HONC, D., JINDŘICH, J. *Nová měřicí jednotka CTRL V3* [PDF dokument]. 7 s. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab03/klan.pdf

KLEČKA, R., MAHDAL, M. 2007 *Identifikace a návrh regulátoru pro hydraulicko-pneumatickou soustavu*. Ostrava, VŠB - Technická univerzita Ostrava 2007, 11 s. ISBN 978-80-248-1272-4.

Dostupné z: <http://akce.fs.vsb.cz/2007/asr2007/Proceedings/papers/093.pdf>

MONTES, C. 2009 *Regulace systému nádrží*. Ostrava, 2009. Bakalářská práce. Ostrava, VŠB-Technická Univerzita Ostrava.

NOSKIEVIČ, P. 1999. *Modelování a identifikace systému*. Ostrava, Montanex a.s. 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.

SLOVÁK, T., RIEDL, Z. *Identifikace a syntéza řízení technologických procesů* Ostrava, VŠB - Technická univerzita Ostrava Dostupné z http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/index.htm

ŠKRABÁNEK, P. 2004 *Matematický model hydraulicko-pneumatické soustavy* [Diplomová práce]. Pardubice, Univerzita Pardubice, 2004

ŠULC, B., VÍTEČKOVÁ, M. 2004 *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. 1. vyd. Praha, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004. 333 s. ISBN 80-01-03007-5.

VÍTEČEK, A., VÍTEČKOVÁ, M. 2013 *Closed Loop Control of Mechatronic Systems*. Ostrava, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3149-7

VÍTEČEK, A., VÍTEČKOVÁ, M. 2008 *Základy automatické regulace*. Přepřac. 2. vyd. Ostrava, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 243s. ISBN 978-80-248-1924-2.

VÍTEČKOVÁ, M. 2002 *Seřízení číslicových a analogových regulátorů metodou požadovaného modelu*. Ostrava, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2002. 8 s.

ZAPLATÍLEK, K., DOŇAR, B. 2004 *MATLAB - tvorba uživatelských aplikací*. 1. vyd. Praha BEN, 2004. 215 s. ISBN 80-7300-133-0.

Přílohy

Seznam příloh

- I. Zdrojové soubory uživatelské aplikace.
- II. Uživatelský manuál pro měření na laboratorním modelu.

I. Zdrojové soubory uživatelské aplikace

Zde jsou jednotlivé funkční m-soubory aplikace, které se využívají pro konkrétní měření.

```
%Měření přechodové charakteristiky
function [wR, zTR, wL, zTL, T] = PreChar()
%načtení zadaných hodnot
wR=str2double(get(findobj('Tag','edit_wR'),'string'));
zTR=str2double(get(findobj('Tag','edit_zTR'),'string'));
wL=str2double(get(findobj('Tag','edit_wL'),'string'));
zTL=str2double(get(findobj('Tag','edit_zTL'),'string'));
T=str2double(get(findobj('Tag','edit_T'),'string'));
save('parametry'); %uložení zadaných parametrů
[x1,~,y1,y2]=sim('modell1.mdl',[0 T]); %spouštění simulace lab. modelu
save('prubehy[V]','x1','y1','y2'); %uložení naměřených hodnot
y1=3.0833*y1-2.205; %přepočet na výšku nádrží v [cm]
y2=3.1738*y2-2.6821; %přepočet na výšku nádrží v [cm]
[n,m]=size(y1);
    for i=1:n
        if (y1(i,1)<0)
            y1(i,1)=0;
        end
        if (y1(i,2)<0)
            y1(i,2)=0;
        end
    end

[n,m]=size(y2);
for i=1:n
if (y2(i,1)<0)
    y2(i,1)=0;
end
if (y2(i,2)<0)
    y2(i,2)=0;
end
end

end

save('prubehy[cm]','x1','y1','y2'); %uložení naměřených hodnot
%Vykreslení grafů
h=figure('Name','Vykreslení Přechodové
Charakteristiky','color','white');
figure(h)
subplot(211);
plot(x1,y1);
title('Přechodová charakteristika pravá nádrž');
xlabel('t [s]');
ylabel('y (t)');
grid on;
figure(h)
subplot(212);
plot(x1,y2);
title('Přechodová charakteristika levá nádrž');
xlabel('t [s]');
ylabel('y (t)');
grid on;
sim('modelSTOP.mdl'); %spuštění sim. modelu pro zastavení čerpadel
end
%Měření PID regulace
function [wR, zTR, wL, zTL, T, kpL, TiL, TdL, kpR, TiR, TdR] = PIDreg()
%načtení zadaných hodnot
```

```

wR=str2double(get(findobj('Tag','edit_wR'),'string'));
zTR=str2double(get(findobj('Tag','edit_zTR'),'string'));
wL=str2double(get(findobj('Tag','edit_wL'),'string'));
zTL=str2double(get(findobj('Tag','edit_zTL'),'string'));
T=str2double(get(findobj('Tag','edit_T'),'string'));
kpL=str2double(get(findobj('Tag','edit_kp_L'),'string'));
TiL=str2double(get(findobj('Tag','edit_Ti_L'),'string'));
TdL=str2double(get(findobj('Tag','edit_Td_L'),'string'));
kpR=str2double(get(findobj('Tag','edit_kp_R'),'string'));
TiR=str2double(get(findobj('Tag','edit_Ti_R'),'string'));
TdR=str2double(get(findobj('Tag','edit_Td_R'),'string'));
%výpočet integrační a derivační konstanty levé nádrže
if TiL>0
    TiL=kpL/TiL;
else
    TiL=0;
end
TdL=TdL*kpL;
%výpočet integrační a derivační konstanty pravé nádrže
if TiR>0
    TiR=kpR/TiR;
else
    TiR=0;
end
TdR=TdR*kpR;
save('parametryPID'); %uložení zadaných hodnot
[xx1,~,yy1,yy2]=sim('model2.mdl',[0 T]); %spuštění měření lab. modelu
save('prubehyPID[V]','xx1','yy1','yy2'); %uložení naměřených hodnot
yy1=3.0833*yy1-2.205; %přepočet na výšku v pravé nádrži v [cm]
[n,m]=size(yy1);
for i=1:n
    if (yy1(i,1)<0)
        yy1(i,1)=0;
    end
    if (yy1(i,2)<0)
        yy1(i,2)=0;
    end
end
yy2=3.1738*yy2-2.6821; %přepočet na výšku v levé nádrži v [cm]
[n,m]=size(yy2);
for i=1:n
    if (yy2(i,1)<0) %podmínky pro záporné hodnoty při přepočtu
        yy2(i,1)=0;
    end
    if (yy2(i,2)<0)
        yy2(i,2)=0;
    end
end
save('prubehyPID[cm]','xx1','yy1','yy2'); %uložení přepočítaných hodnot
%vykreslení naměřených průběhů
h1=figure('Name','Vykreslení PID regulace','color','white');
figure(h1)
subplot(211);
plot(xx1,yy1);
title('Přechodová charakteristika PID regulace pravá nádrž');
xlabel('t [s]');
ylabel('y (t)');
grid on;
figure(h1)
subplot(212);
plot(xx1,yy2);
title('Přechodová charakteristika PID regulace levá nádrž');
xlabel('t [s]');
ylabel('y (t)');

```

```
grid on;
sim ('modelSTOP.mdl'); %spuštění sim. modelu pro zastavení čerpadel
end
```

Zde je m-soubor spouštějící se po stisknutí tlačítka *START*. V m-souboru jsou zahrnuty kontroly zadaných hodnot a podmínka spouštějící daný funkční m-soubor.

```
%Tlačítko START
if get(findobj('Tag','rb_PreChar'),'Value')==1
    %Zadání hodnot
    %Žádaná hodnota pravé nádrže
    wR=str2double(get(findobj('Tag','edit_wR'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(wR)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    if wR>8
        errordlg('Max value w=8','Invalid Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %Doba zpoždění žádané hodnoty pravé nádrže
    zTR=str2double(get(findobj('Tag','edit_zTR'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(zTR)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %Žádaná hodnota levé nádrže
    wL=str2double(get(findobj('Tag','edit_wL'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(wL)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    if wL>8
        errordlg('Max value w=8','Invalid Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %Doba zpoždění žádané hodnoty levé nádrže
    zTL=str2double(get(findobj('Tag','edit_zTL'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(zTL)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %Doba simulace
    T=str2double(get(findobj('Tag','edit_T'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(T)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
```

```

        end
        [wR,zTR,wL,zTL,T] = PreChar(); %spouštění funkce PreChar
elseif get(findobj('Tag','rb_PIDreg'),'Value')==1
    %Zadání hodnot
    %Žádaná hodnota pravé nádrže
    wR=str2double(get(findobj('Tag','edit_wR'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(wR)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    if wR>8
        errordlg('Max value w=8','Invalid Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %Doba zpoždění žádané hodnoty pravé nádrže
    zTR=str2double(get(findobj('Tag','edit_zTR'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(zTR)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %Žádaná hodnota levé nádrže
    wL=str2double(get(findobj('Tag','edit_wL'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(wL)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    if wL>8
        errordlg('Max value w=8','Invalid Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %Doba zpoždění žádané hodnoty levé nádrže
    zTL=str2double(get(findobj('Tag','edit_zTL'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(zTL)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %Doba simulace
    T=str2double(get(findobj('Tag','edit_T'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(T)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %parametry regulátoru Leve nadrže
    %zesílení regulátoru
    kpL=str2double(get(findobj('Tag','edit_kp_L'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(kpL)

```



```

        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %integrační konstanta regulátoru
    TiL=str2double(get(findobj('Tag','edit_Ti_L'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(TiL)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %derivační konstanta regulátoru
    TdL=str2double(get(findobj('Tag','edit_Td_L'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(TdL)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %parametry regulatoru Prave nadrže
    %zesílení regulátoru
    kpR=str2double(get(findobj('Tag','edit_kp_R'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(kpR)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %integrační konstanta regulátoru
    TiR=str2double(get(findobj('Tag','edit_Ti_R'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(TiR)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end
    %derivační konstanta regulátoru
    TdR=str2double(get(findobj('Tag','edit_Td_R'),'string'));
    %error dialog
    if isnan(TdR)
        errordlg('You must enter a numeric value','Invalid
Input','modal')
        uicontrol(hObject)
        return
    end

    %výpočet integrační a derivační konstanty levé nádrže
    if TiL>0
        TiL=kpL/TiL;
    else
        TiL=0;
    end
    TdL=TdL*kpL;

    %výpočet integrační a derivační konstanty pravé nádrže
    if TiR>0
        TiR=kpR/TiR;

```

```
        else
            TiR=0;
        end
        TdR=TdR*kpR;
[wR,zTR,wL,zTL,T,kpL,TiL,TdL,kpR,TiR,TdR] = PIDreg(); %spouštění funkce
PIDreg
end;
```

Zde je m-soubor tlačítka *STOP*, zahrnuje zastavení příslušné simulace a spuštění modelu k zastavení měření.

```
%Tlacitko STOP
if get(findobj('Tag','rb_PreChar'),'Value')==1
    set_param('model1','SimulationCommand','stop')
elseif get(findobj('Tag','rb_PIDreg'),'Value')==1
    set_param('model2','SimulationCommand','stop')
end;
sim('modelSTOP.mdl');
```

II. Uživatelský manuál pro měření na laboratorním modelu

Předpoklad pro měření na laboratorním modelu je, že zdroj ovládací jednotky je připojen k napájecímu napětí a je spuštěn tlačítkem.

1. Uživatel otevře požadovaný soubor *Labmodel.fig* v prostředí GUIDE, pravým tlačítkem myši a výběrem *Open in GUIDE*.
2. Po otevření souboru uživatel vybere ze záložky *Tools* příkaz *Run* nebo spustí aplikaci klávesovou zkratkou CTRL+T.
3. Po spuštění aplikace uživatel vybere příslušné měření (Přechodová charakteristika, PID regulace).
4. Po vyplnění žádaných hodnot spustí dané měření tlačítkem *START*. (POZOR při větší žádané hodnotě než 5V musí uživatel uzavřít vzdušníky vrchních nádrží, při PID regulaci vzdušníky musí uživatel uzavřít už při hodnotě vyšší než 4V).
5. Tlačítko *STOP* je určeno k zastavení probíhajícího měření na laboratorním modelu.
6. Po dokončení měření má uživatel k dispozici nastavené hodnoty a naměřené průběhy uložené v souborech (*hodnoty(PID).mat*, *průběhy(PID) [V]/[cm].mat*) v adresáři aplikace.
7. Pokud uživatel chce pokračovat v měření, opakuje postup od bodu č. 4., pokud nechce pokračovat, ukončí aplikaci tlačítkem *KONEC*.